

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

**Evaluación de un lodo deshidratado de papelera
como sustrato de cultivo para plantas
ornamentales**

presentado por

Diana Marín Ederra

MÁSTER EN AGROBIOLOGÍA AMBIENTAL

Septiembre, 2016 / 2016, Iraila

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

Evaluación de un lodo deshidratado de papelera como sustrato de cultivo para plantas ornamentales

presentado por

Diana Marín Ederra

dirigido por

Julio Muro Erreguerena

Septiembre, 2016 / 2016, Iraila

Agradecimientos

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido, de una manera u otra, a la realización de este Trabajo Fin de Máster.

A mi familia, por su apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y, en general, por todo.

A mi tutor, Julio Muro Erreguerena, por haber confiado en mí y haberme ayudado en todo lo necesario. Gracias por estar disponible siempre que lo necesitaba.

A los trabajadores de la Finca de Prácticas de la Universidad Pública de Navarra. Sobre todo a Joxepe por ayudarme con todo lo que estaba en su mano en esos calurosos días de verano.

Por último, a mi compañero de vida, Ignacio, por apoyarme durante todos estos meses y tener siempre disponibles tus mejores palabras de ánimo. Contigo todo resulta más sencillo.

Resumen

Un problema de gran importancia hoy en día es la eliminación de los residuos resultantes de los procesos de producción. La industria papelera cuenta en España con unas 100 fábricas, en cuyos procesos de fabricación se genera un importante volumen de residuos sólidos. Uno de los objetivos que se propone el sector papelero para el período 2015-2017 es el análisis y búsqueda de nuevas vías de valorización de residuos de proceso para minimizar el envío a vertedero.

Por otro lado, la turba es el medio de cultivo más común en la producción de plantales ornamentales debido a la idoneidad de sus propiedades. Sin embargo, es un recurso natural no renovable, por lo que se hace necesaria la búsqueda de sustratos alternativos para la producción de plantas a gran escala.

En este trabajo se ha evaluado la posible utilización de un Lodo Deshidratado de Papelera (LDP) como sustrato para la producción de plantas de geranio (*Pelargonium zonale*) y petunia (*Petunia hybrida*) de calidad. Para ello se ha planteado un ensayo en macetas con diferentes proporciones de LDP y turba y se han visto importantes diferencias significativas entre las distintas mezclas propuestas.

Palabras clave: residuos, lodo deshidratado de papelera, sustrato, plantas ornamentales.

Abstract

Nowadays, there is a significant problem related with the disposal of waste, resulting from the production process. The paper industry has about one hundred factories in Spain and in that manufacturing process, a significant amount of solid waste is produced. One of the proposed aims of the paper industry for the 2015-2017 period is the analysis and research of new ways of waste recovery to minimise landfill disposal.

On the other hand, peat is the most common container media for the growing of ornamental plants, because of the adequacy of its properties. However, it is a non-renewable natural source, so it is necessary to look for alternative substrates to produce plants on a big scale.

In this research the use of a Paper Mill Sludge (PMS) has been evaluated as a new substrate to produce high quality geranium (*Pelargonium zonale*) and petunia (*Petunia hybrida*).

With this aim in view, a trial has been made, using flower pots with different proportions of PMS and peat. As a result, depending on the mixture, significant differences have been observed.

Keywords: waste, paper mill sludge, substrate, ornamental plants.

Índice general

1. ANTECEDENTES	15
1.1. EL PROBLEMA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS	15
1.1.1. Desarrollo sostenible: economía circular y el residuo cero	19
1.2. LA INDUSTRIA PAPELERA	20
1.3. LOS SUSTRATOS	24
1.3.1. Cultivo de semilleros y plantas en maceta. Búsqueda de sustratos alternativos	26
1.3.2. Propiedades de los sustratos	29
1.3.2.1. <i>Propiedades físicas de los sustratos</i>	30
1.3.2.2. <i>Propiedades químicas de los sustratos</i>	32
1.3.3. Utilización de lodos como sustrato alternativo	33
2. OBJETIVO	35
3. MATERIAL Y MÉTODOS	35
3.1. MATERIAL DE PARTIDA: SUSTRATOS	35
3.1.1. Lavado del lodo deshidratado de papelera	36
3.2. PRUEBAS DE FITOTOXICIDAD: BIOENSAYOS DE GERMINACIÓN	38
3.3. ENSAYO AGRONÓMICO: CRECIMIENTO DE PLANTAS ORNAMENTALES	40
3.3.1. Preparación de las mezclas	41
3.3.2. Caracterización de las mezclas	41
3.3.2.1. <i>Propiedades físicas</i>	41
3.3.2.2. <i>Propiedades físico-químicas</i>	43
3.3.3. Ensayos de crecimiento en invernadero	43
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	45
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
4.1. EFECTO DEL LAVADO DEL LODO DESHIDRATADO DE PAPELERA (LDP)	46
4.2. PRUEBAS DE FITOTOXICIDAD: BIOENSAYO DE GERMINACIÓN	48
4.3. ENSAYO AGRONÓMICO: CRECIMIENTO DE PLANTAS ORNAMENTALES	49
4.3.1. Caracterización de las mezclas	50
4.3.1.1. <i>Propiedades físicas</i>	50
4.3.1.2. <i>Propiedades físico-químicas</i>	51
4.3.2. Ensayo de crecimiento en invernadero	53
4.3.2.1. <i>Germinación y mortalidad de las semillas</i>	53
4.3.2.2. <i>Crecimiento, desarrollo y floración de las plantas</i>	57
4.4. DISCUSIÓN GENERAL	67
5. CONCLUSIONES	69
6. BIBLIOGRAFÍA	71
7. ANEXO	75

Índice de figuras

Figura 1 - Generación (%) de residuos por actividades económicas y hogares por la totalidad de los países de la Europa-28 en el año 2012. (Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de EUROSTAT (2015))	16
Figura 2 - Generación de residuos en el año 2012 por cada uno de los países de la Europa-28. Se consideran “Residuos peligrosos” aquellos que contienen en su composición una o varias sustancias que les confieren características peligrosas, en cantidades o concentraciones tales, que representan un riesgo para la salud humana, los recursos naturales o el medio ambiente. (Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de EUROSTAT(2015))	17
Figura 3 - Evolución de la generación de residuos en España desde el año 2004 al 2012. (Fuente: Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (España, 2015))	17
Figura 4 - Gestión de residuos en Europa por países en 2012 (%) (Fuente: elaboración propia con datos de EUROSTAT (2015))	18
Figura 5 - Mapa de localización de las distintas industrias papeleras en España	21
Figura 6 - Distintas vías de valorización de los residuos generados en la industria papelera española y porcentaje que representan dentro de la gestión de los mismos (fuente: Aspapel (2015)).....	22
Figura 7 - Aspecto del lodo deshidratado de papelera objeto de estudio	35
Figura 8 - Proceso de lavado del lodo deshidratado. a) Vista exterior de los bidones utilizados para el lavado. b) Grava y malla colocadas en el interior del bidón. c) Lodo con agua a partes iguales para el lavado. d) Apariencia del lodo una vez drenada el agua de lavado.	37
Figura 9 - Pasta saturada de cada una de las muestras analizadas.....	38
Figura 10 - Extracto de saturación obtenido por filtrado de cada una de las muestras analizadas.....	39
Figura 11 - Izda: Placa de petri sembrada con 12 semillas de lechuga. Dcha: Placas de petri colocadas a germinar en la cámara de germinación.....	39
Figura 12 - Izda: Placa de petri con semillas de berro germinadas. Dcha: medida de la longitud radical con un calibre electrónico.	40
Figura 13 - Izda: Placa de Petri con semillas de lechuga germinadas. Dcha: medida de la longitud radical con un calibre electrónico.	40
Figura 14 - Hormigonera utilizada para realizar las mezclas de sustrato	41
Figura 15 - Izda: Cilindro y malla utilizados para determinar la Capacidad de retención de agua (CRA) de las diferentes mezclas propuestas. Dcha: Muestras saturadas con agua destilada drenando sobre una rejilla.....	42

Figura 16 - pHímetro y conductivímetro portátiles utilizados para realizar las medidas de pH y conductividad eléctrica de las muestras.	43
Figura 17 - Vista general de las bandejas de semillero recién sembradas.	44
Figura 18 - Evolución de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) medida en el extracto de saturación de cada muestra en relación con los lavados sucesivos del LDP. (L0: LDP sin lavar, L1: LDP lavado una vez, L2: LDP lavado dos veces, L3: LDP lavado tres veces, L4: LDP lavado cuatro veces).	47
Figura 19 - Evolución del pH medido en la pasta saturada de cada muestra en relación con los lavados sucesivos del LDP. (L0: LDP sin lavar, L1: LDP lavado una vez, L2: LDP lavado dos veces, L3: LDP lavado tres veces, L4: LDP lavado cuatro veces).	47
Figura 20 - Seguimiento de la germinación de 30 semillas de petunia de cada tratamiento, desde el día 15 de mayo al día 6 de junio.	53
Figura 21 - Seguimiento de la mortalidad de las 30 plantas de petunia de cada tratamiento, desde el día 6 de junio al 12 de agosto.	54
Figura 22 - Seguimiento de la germinación de las 30 semillas de geranio de cada tratamiento, desde el día 15 de mayo al día 15 de junio.	55
Figura 23 - Seguimiento de la mortalidad de las 30 plantas de geranio de cada tratamiento, desde el día 15 de junio al 18 de agosto.	55
Figura 24 - Síntomas de fitotoxicidad en plantas de geranio. Izda: plantas en semillero con pocos días de crecimiento. Dcha: plantas en maceta al final del ensayo, después de más de 3 meses de crecimiento. .	56
Figura 25 - Imágenes de la contaminación por hongos que se produjo en algunas bandejas a principios del mes de junio.	57
Figura 26 - Valores de peso fresco (PF, g/planta), obtenidos para las plantas de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.	58
Figura 27 - Valores de peso seco (PS, g/planta) obtenidos para las plantas de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.	59
Figura 28 - Altura de vástago (mm/planta) obtenida para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.	59
Figura 29 - Número medio de hojas por planta de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.	60
Figura 30 - Número medio de flores por planta de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.	61
Figura 31 - Comparación entre plantas de petunia crecidas en cada uno de los sustratos ensayados. ...	61

Figura 32 - Comparación entre plantas de petunia crecidas en cada uno de los sustratos en los cuales el LDP estaba lavado.	61
Figura 33 - Comparación entre plantas de petunia crecidas en cada uno de los sustratos en los cuales el LDP estaba sin lavar.	62
Figura 34 - Valores de peso fresco (PF, g/planta), obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.....	63
Figura 35 - Valores de peso seco (PS, g/planta), obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.....	64
Figura 36 - Resultados de altura del vástago (mm) obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. (Mezclas: 1: 100% lodo deshidratado de papelera. 2: 75% papel+ 25% turba. 3: 50% papel + 50% turba. 4: 25% papel + 75% turba. 5: 100% turba).	64
Figura 37 - Resultados de número de hojas obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. (Mezclas: 1: 100% lodo deshidratado de papelera. 2: 75% papel+ 25% turba. 3: 50% papel + 50% turba. 4: 25% papel + 75% turba. 5: 100% turba).....	65
Figura 38 - Comparación entre plantas de geranio crecidas en cada uno de los sustratos ensayados.	66

Índice de tablas

Tabla 1 - Evolución de la cantidad de residuos sólidos (en toneladas) generados por la industria papelera española por tipo de residuos desde el año 2006 al 2014 (Fuente: Elaboración propia con datos de Aspapel (2015)).	22
Tabla 2 - Evolución de la gestión de los residuos papeleros de proceso (% del total) desde el año 2006 al 2014 (Fuente: Elaboración propia con datos de Aspapel (2015))	23
Tabla 3 - Características más deseables para un sustrato (Fuente: elaboración propia con datos de Ramos, 2005).	29
Tabla 4 - Mezclas obtenidas para el bioensayo agronómico.	41
Tabla 5 - pH y CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de las muestras de agua y sustrato tomadas después de cada uno de los lavados realizados al LDP.	46
Tabla 6 - Valores de % de germinación (%G), longitud radicular (L_m , mm) e Índice de germinación (IGe) obtenidos en los bioensayos de germinación para cada muestra.	48
Tabla 7 - Caracterización física de las mezclas empleadas en el ensayo. (D_A : densidad aparente; CRA: Capacidad de Retención de Agua)	50
Tabla 8 - Caracterización físico-química (pH y CE) de las 8 mezclas preparadas a base de lodo deshidratado de papelera y turba. (CE: conductividad eléctrica)	51
Tabla 9 - Parámetros de crecimiento y desarrollo de las plantas de petunia para cada una de las mezclas a base de LDP y turba estudiadas. Datos por planta	57
Tabla 10 - Parámetros de crecimiento y desarrollo de las plantas de petunia para cada una de las mezclas a base de LDP y turba estudiadas. Datos por planta. (PF (g/planta): peso fresco. PS (g/planta): peso seco).	62

1. ANTECEDENTES

1.1. EL PROBLEMA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS

El incremento de la población mundial y, en consecuencia, el explosivo desarrollo urbano e industrial, ha generado un elevado volumen de productos considerados residuos. Estos materiales deben eliminarse de los ecosistemas para evitar que su presencia se convierta en un factor degradante de la calidad del ambiente y, por ende, en materiales contaminantes (Ramos, 2005). Esta generación masiva de residuos está creando un importante problema a nivel global, por lo que resulta urgente hallar las soluciones adecuadas para solventarlo de la forma más sostenible posible.

Según la ONU, en su informe de mayo de 2011 señalaba que ese año se extrajeron de la tierra 60.000 millones de toneladas (Mt) de recursos naturales o materias primas, previéndose que esta cantidad se elevaría a 100.000 Mt en 2013 y a 140.000 Mt en 2015 si el ritmo de consumo se mantenía. En torno al 10% de estos recursos, según diferentes estudios, en alguno sólo el 7%, son transformados en bienes útiles, mientras que el 90% restante se convierte en residuos (Del Val, 2013).

En primer lugar, conservar los recursos naturales implica reducir su consumo y aumentar la eficiencia de su transformación en bienes utilizables. Y, en segundo lugar, es necesario llevar a cabo un conjunto de buenas prácticas que permitan el máximo aprovechamiento de estos, con una reducción significativa de su impacto ambiental tanto en el medio atmosférico como en el edáfico y el hídrico, todos ellos interrelacionados. Para ello, es necesario partir del criterio de que los residuos deben considerarse en su doble y compleja naturaleza: material y energética. La valoración de un residuo determinado debe contar con una metodología que permita conocerlo en su totalidad, tanto en lo que respecta a sus posibles diferentes orígenes como a su estado de presentación, riesgo contaminante y tratamiento más adecuado (Del Val, 2009).

En la actualidad, se promueve la gestión de residuos orgánicos para así disminuir la materia orgánica llegada a vertederos y favorecer la fijación de carbono al aplicar compost en el suelo (Moreno y Moral, 2008). Sin embargo, se produce una aparente paradoja en la gestión de residuos, ya que a medida que se depuran las aguas residuales y las emisiones atmosféricas, se generan más residuos sólidos. Ello es debido a que en lugar de diluir y dispersar los contaminantes en el río, mar o atmósfera, estos se separan y concentran en forma de fangos y residuos en fase sólida (lodos, polvos...) (Elías, 2009).

Según la Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre de 2008, se conoce como “residuo” a cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse. Estos residuos pueden representar una enorme pérdida de recursos tanto en forma de materiales como de energía, además de que su gestión y eliminación puede tener un impacto importante en el medio ambiente. Los vertederos, por ejemplo, ocupan terreno y pueden contaminar el aire, el agua y el suelo, mientras que la incineración puede dar lugar a emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos, a menos que se regule correctamente (Eurostat, 2015). Por tanto, es necesario reducir la cantidad de residuos generados y promover que los residuos se conviertan en un recurso, minimizando así el impacto sobre el medio ambiente y la salud.

De acuerdo con los datos proporcionados por Eurostat (2015), en 2012 la cantidad total de residuos generados en la EU-28 por la totalidad de actividades económicas y hogares ascendió a 2.515 millones de toneladas, encontrándose importantes diferencias entre los distintos Estados miembros.

En la Figura 1 se puede observar la participación de las distintas actividades económicas y de los hogares en la generación total de residuos en la EU-28 en el año 2012. La construcción y la demolición contribuyeron con un 33% del total, siendo el valor más elevado, seguido de cerca por las industrias extractivas (29%).

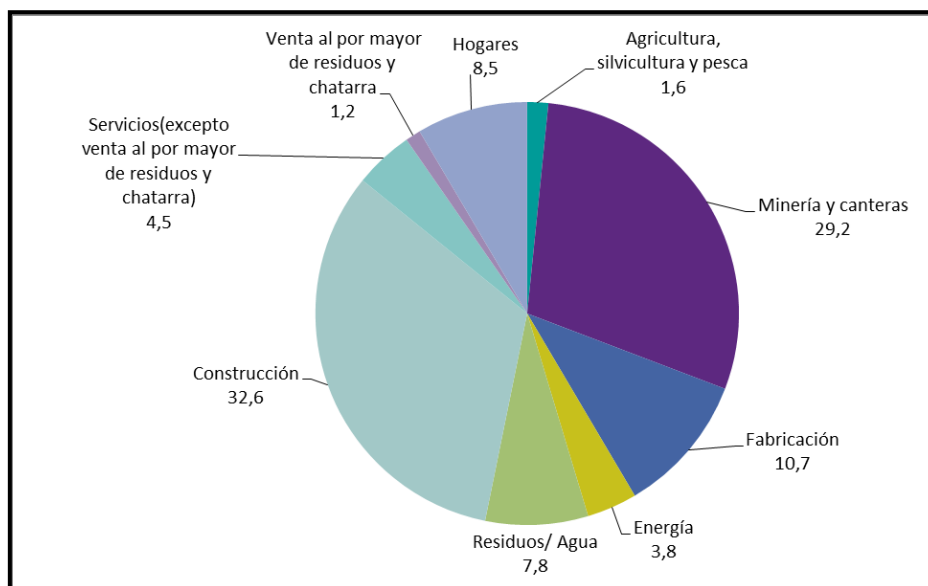


Figura 1 - Generación (%) de residuos por actividades económicas y hogares por la totalidad de los países de la Europa-28 en el año 2012. (Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de EUROSTAT (2015))

Si dividimos por países la generación de residuos en Europa en el año 2012, observamos en la Figura 2 que Francia y Alemania son los países que mayor cantidad de residuos generaron, seguidos por Rumanía y Reino Unido. España se encuentra en la mitad del gráfico, con un total de 118 millones de toneladas producidas en el año 2012, cifra que ha descendido en los últimos años debido sobre todo a la crisis económica y a los programas de mejora de la gestión de residuos (Figura 3).

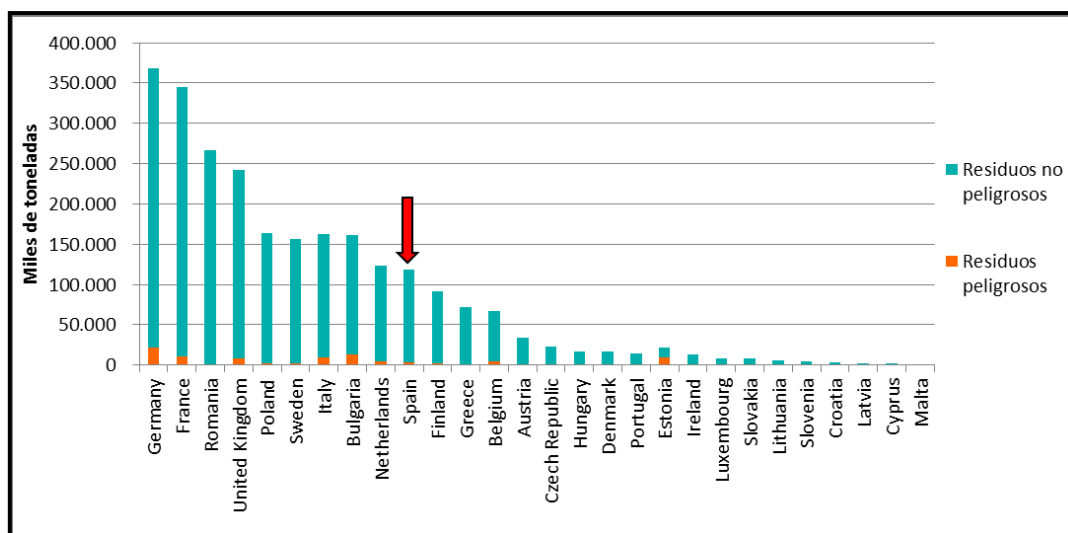


Figura 2 - Generación de residuos en el año 2012 por cada uno de los países de la Europa-28. Se consideran “Residuos peligrosos” aquellos que contienen en su composición una o varias sustancias que les confieren características peligrosas, en cantidades o concentraciones tales, que representan un riesgo para la salud humana, los recursos naturales o el medio ambiente. (Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de EUROSTAT(2015))

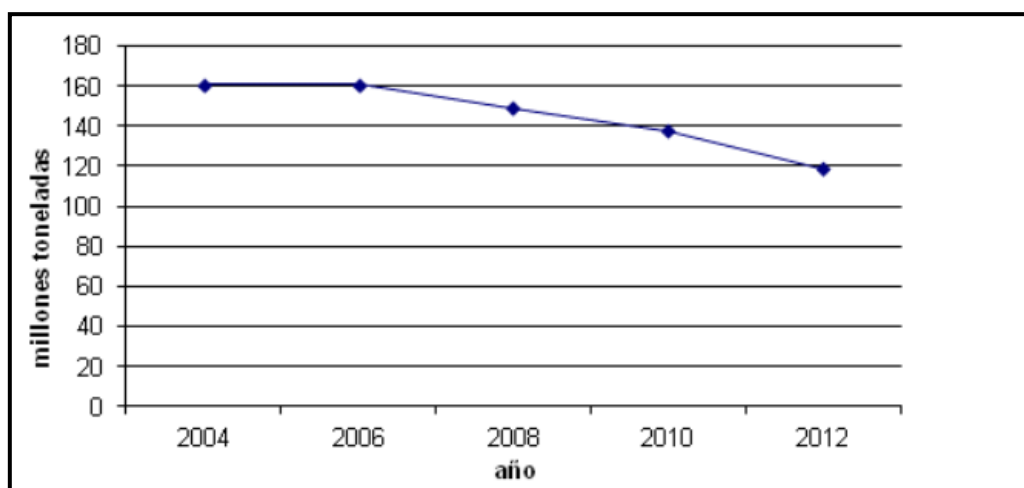


Figura 3 - Evolución de la generación de residuos en España desde el año 2004 al 2012. (Fuente: Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (España, 2015))

En cuanto a la gestión de residuos, vemos en la Figura 4 que hay diferencias importantes entre los distintos países de la UE-28. Según Eurostat (2015), en España en el año 2012 todavía el 48% del total de los residuos generados se destinaban a vertedero, a pesar de los avances conseguidos en el tratamiento de los residuos en los últimos años (Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos, 2015).

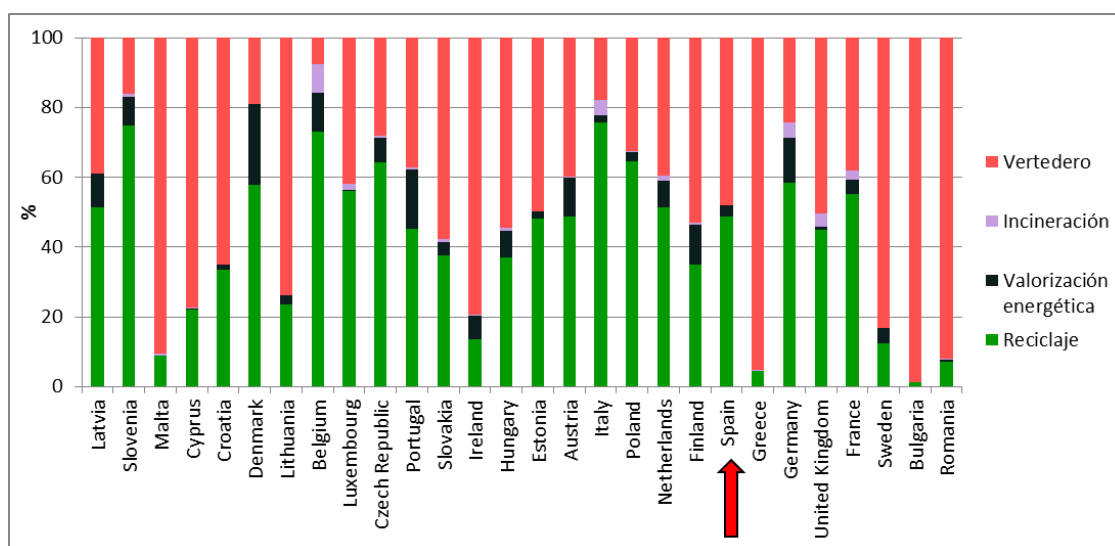


Figura 4 - Gestión de residuos en Europa por países en 2012 (%) (Fuente: elaboración propia con datos de EUROSTAT (2015))

A la vista de los datos presentados se ve necesario un cambio en la mentalidad de la población para minimizar la cantidad de residuos generados, para lo cual es indispensable que los gobiernos implanten normativas restrictivas que obliguen a los diferentes sectores generadores de residuos a estudiar posibles alternativas de gestión de residuos, partiendo por minimizar su generación.

El planteamiento de la Unión Europea sobre gestión de residuos se basa en tres principios: prevención de residuos, reutilización y reciclado; y mejora de la eliminación final y seguimiento. La prevención de residuos puede lograrse a través de tecnologías más limpias, diseño ecológico o modelos de producción y consumo más eficientes desde el punto de vista ecológico. La prevención y reciclado de residuos, que se centra en la tecnología de los materiales, puede también reducir el impacto medioambiental de los recursos que se utilizan limitando la extracción y transformación de las materias primas durante el proceso de producción. Siempre que sea posible, los residuos que no puedan reciclarse o reutilizarse deben poderse incinerar de manera segura, de forma que solo se recurra a los vertederos como último recurso. Estos métodos deben vigilarse atentamente debido a su potencial para causar graves daños medioambientales (Eurostat, 2015).

Afortunadamente, a lo largo de los últimos años han ido produciéndose una serie de acciones que están impulsando al sector industrial a tomar en consideración cuestiones antes ignoradas. Antaño, las obligaciones de cualquier empresa se ceñían a la creación de riqueza y empleo, pero hoy en día esto está cambiando. Una legislación cada vez más exigente, la mayor conciencia medioambiental de la sociedad, el encarecimiento de las materias primas y de los recursos naturales y la creciente responsabilidad social de las empresas que compiten en el mercado han propiciado que el sector industrial vea la inversión en medio ambiente como algo rentable y necesario (Corrochano, 2006).

Actualmente la Ley 22/2011 del 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, establece una jerarquía de residuos que debe aplicarse para conseguir el mejor resultado ambiental global, y que sigue el siguiente orden de prioridad:

- Prevención
- Preparación para la reutilización
- Reciclado
- Otro tipo de valorización, incluida la valorización energética
- Eliminación

1.1.1. Desarrollo sostenible: economía circular y el residuo cero

El desarrollo sostenible quedó definido por el informe “Nuestro Futuro Común” como aquel que “satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras”. (Brundtland, 1987). En menos de diez años, este concepto ha dejado de ser un concepto debatido por una minoría para pasar a ser una opción a la que se debe tender en cualquier tipo de actividad económica (Red Española de Compostaje, 2015).

La ecología industrial es una disciplina que intenta reproducir en los ciclos industriales lo que la naturaleza realiza en los ecosistemas naturales. Es difícil conseguir la valorización integral de residuos para alcanzar la fase de residuo cero, aunque las nuevas tecnologías y la integración de los sistemas de valorización abren nuevas vías para la consecución de este objetivo (Elías, 2009). En la actualidad, el envío a vertedero de los residuos ha pasado a ser una oportunidad perdida de valorización y una forma no sostenible de gestionar los residuos.

Las ideas de desarrollo sostenible son acogidas, cada vez más, por muchas instituciones y entidades (Elías, 2009). La agricultura resulta ser una actividad potencialmente contaminante de los sistemas naturales donde se desarrolla pero también de aquellos de los cuales extrae

insumos que pueden ser recursos no renovables. En particular, en agricultura intensiva, se destacan aspectos como el uso de la turba como sustrato o el uso ineficiente y la contaminación del agua por el uso indebido de fertilizantes y pesticidas (Red Española de Compostaje, 2015). Dentro de una agricultura sostenible, un objetivo principal es minimizar los impactos ambientales que se derivan de la propia actividad agrícola. La horticultura, cuenta con un amplio margen para servir al reciclado de materiales que actualmente se consideran subproductos, pudiendo con ello contribuir tanto a la conservación como a la disminución en la explotación de recursos no renovables (Macías *et al.*, 2008).

La economía circular es un modelo de producción y consumo en el que los residuos se transforman en recursos, buscando la eficiencia a lo largo de todo el ciclo. El reciclaje es un elemento indispensable dentro de este modelo, e implica productos fácilmente reciclables, separación en origen, eficientes sistemas de recogida y tratamiento, mercados para las materias primas secundarias, etc. Pero este nuevo concepto va más allá del reciclaje, y abarca el ciclo productivo completo: materias primas renovables, recursos locales, ecodiseño, eficiencia en los procesos de fabricación, nuevos modelos de consumo, etc. En España, la industria de la cadena del papel se reivindica como un sector que ya aplica este modelo. La economía circular del papel convierte la madera en productos papeleros que se reciclan una y otra vez en nuevos productos papeleros. En cuanto a la gestión de residuos, como veremos en el próximo apartado, es un aspecto especialmente relevante en lo que se refiere a eficiencia del proceso de fabricación de papel. Después de su uso, los productos papeleros cierran el ciclo convirtiéndose de nuevo en recursos, de acuerdo al postulado esencial de la economía circular (Residuos profesional, 2015).

1.2. LA INDUSTRIA PAPELERA

La sociedad demanda, cada vez más, procesos y productos respetuosos con el medio ambiente. El sector de la celulosa y el papel viene trabajando en estos aspectos desde hace muchos años, con el objetivo de dar cumplimiento a esta demanda de la sociedad, con procesos más eficientes y productos naturales, renovables y reciclables como el papel (Sánchez, 2012).

España es el quinto productor europeo de celulosa, posición que conquistó al superar a Francia en 2011. Le acompañan en ese grupo de cabeza Suecia y Finlandia, las dos grandes potencias forestales europeas (España es el tercer país de la UE en superficie forestal), Alemania, la gran

potencia industrial, y Portugal. Somos además el sexto productor de papel de la UE, por detrás de Alemania, Finlandia, Suecia, Italia y Francia, tras superar al Reino Unido en 2006. (Aspapel, 2015). El sector del papel en España cuenta con 10 fábricas de celulosa, que producen 1.9 millones de toneladas de celulosa, y 67 fábricas papeleras con una producción total de 6 millones de toneladas de papel. Las plantas están distribuidas por todo el territorio, si bien las zonas de mayor implantación son Aragón, Cataluña, País Vasco, Navarra, Castilla y León y la Comunidad Valenciana. (Aspapel, 2015).

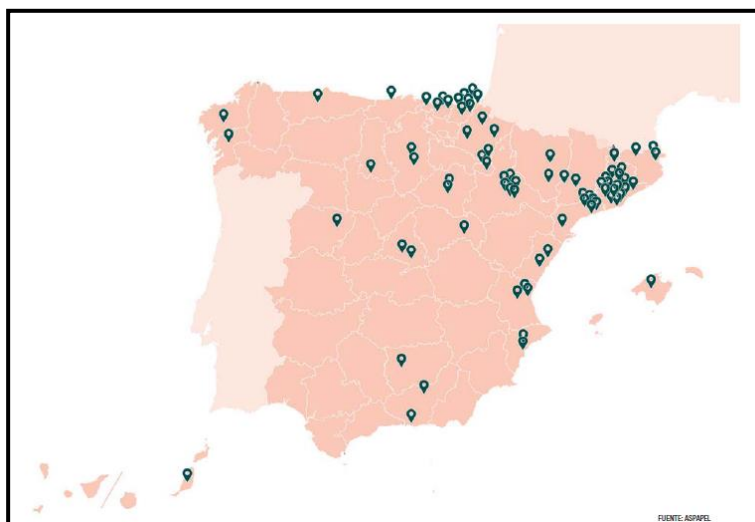


Figura 5 - Mapa de localización de las distintas industrias papeleras en España (Fuente: Aspapel (2015))

Aspapel (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón) es una organización profesional de ámbito estatal (asociación sin ánimo de lucro), que agrupa a las empresas de la industria de la celulosa y el papel en España. Las empresas asociadas suponen más del 80% de la producción del sector (Aspapel, 2015).

El sector paplero tiene una incidencia potencial considerable sobre el medio ambiente. El ciclo paplero se inicia con la madera, un recurso natural renovable del que se obtienen las fibras que se utilizan como materias primas. El proceso de producción es intensivo en uso de agua y energía; genera residuos y subproductos contaminantes, cuya gestión adecuada es de la mayor relevancia en el comportamiento medioambiental del sector (Corrochano, 2006).

La totalidad de los residuos que se generan a lo largo del proceso de fabricación de celulosa y papel están clasificados en el Catálogo Europeo de Residuos (CER) como no peligrosos. El pequeño porcentaje de residuos peligrosos (0,16% en 2014) no son específicamente papleros, sino los comunes a toda actividad industrial, asociados a trabajos de mantenimiento (cambios de aceites, tubos fluorescentes, baterías...) (Aspapel, 2015).

Tabla 1 - Evolución de la cantidad de residuos sólidos (en toneladas) generados por la industria papelera española por tipo de residuos desde el año 2006 al 2014 (Fuente: Elaboración propia con datos de Aspapel (2015)).

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Residuos no peligrosos específicos de la actividad papelera	1.303.069	1.327.235	1.447.568	1.424.208	1.553.390	1.483.497	1.590.360	1.480.865	1.412.856
Otros residuos no peligrosos	118.504	75.082	82.961	85.435	86.851	110.326	154.420	137.658	158.382
Residuos peligrosos	59.191	203.821	9.026	9.348	2.349	2.452	3.069	2.890	2.500
Total	1.480.764	1.606.138	1.539.555	1.518.991	1.642.590	1.596.275	1.747.849	1.621.413	1.573.738

Dado que la mayor parte de la producción de papel en España es a partir de papel recuperado, la mayoría de los residuos proceden del reciclado de papel. Son, por tanto, materiales impropios, que llegan al proceso junto con la materia prima y que es necesario separar (Sánchez, 2012).

Hasta hace unos años, la mayoría de los lodos provenientes de las industrias papeleras eran enviados a vertedero, contribuyendo así a incrementar la escasez de los vertederos, las elevadas tasas e incrementando las preocupaciones medioambientales y las regulaciones ambientales (Russel, 1996). En la actualidad, la política de gestión de los residuos de proceso consiste en primer lugar en su minimización, a través del control de calidad de la materia prima y de mejoras en el proceso de fabricación, y en segundo lugar en su valorización en distintas aplicaciones o valorización energética. Sólo en el caso de que ninguna otra vía sea posible, se recurre a su eliminación en vertedero controlado. (Aspapel, 2015)

Actualmente según Aspapel (2015) el 81% de los residuos de fabricación se valorizan por distintas vías. Las principales son la valorización energética fundamentalmente en la propia fábrica (27,5%), el uso directo agrícola (22,1%), el compostaje (9,3%) y su uso como materia prima en otras industrias como la cementera o la cerámica (5,8%).

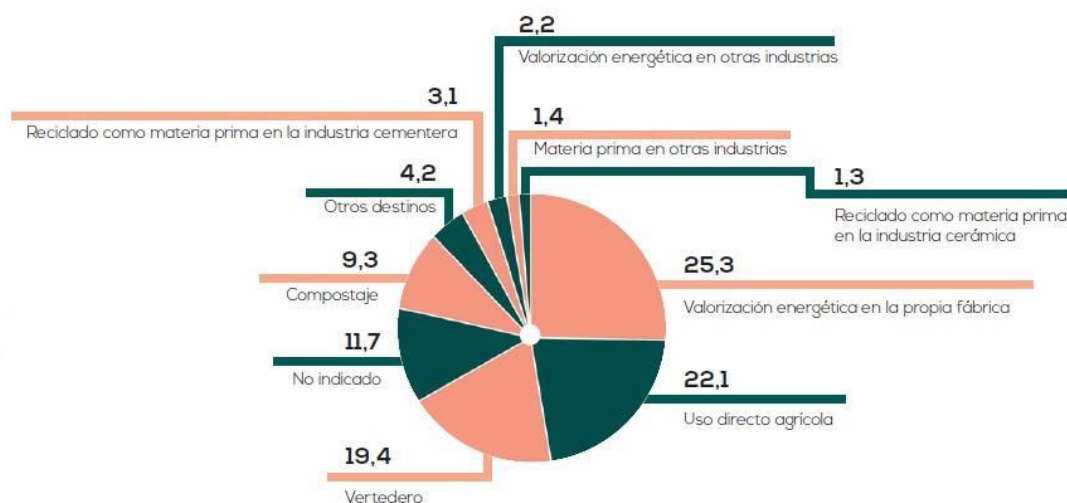


Figura 6 - Distintas vías de valorización de los residuos generados en la industria papelera española y porcentaje que representan dentro de la gestión de los mismos (fuente: Aspapel (2015)).

En cuanto a la evolución de la gestión de los residuos papeleros de proceso en los últimos 10 años (Tabla 2), vemos cómo la valorización energética en la propia fábrica ha cobrado una gran importancia, llegando a alcanzar valores del 25% del total en el año 2014. El compostaje y el uso directo agrícola también han sufrido un notable aumento, alcanzando valores entorno al 30% del total de residuos gestionados. En cambio, el reciclado como materia prima en la industria cerámica, que representaba la vía más importante de gestión de dichos residuos en el año 2006 con un valor del 25%, ha caído de forma drástica como consecuencia de la crisis económica, que se ha notado especialmente en los sectores relacionados con la construcción de vivienda y las obras públicas.

Tabla 2 - Evolución de la gestión de los residuos papeleros de proceso (% del total) desde el año 2006 al 2014
(Fuente: Elaboración propia con datos de Aspapel (2015))

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Vertedero	37,5	39,0	37,5	35,0	35,0	29,0	27,8	22,9	19,4
Valorización energética en la propia fábrica	1,0	2,0	0,5	2,6	2,9	8,8	23,6	27,3	25,3
Valorización energética en otras industrias	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2
Uso directo agrícola	17,0	28,0	33,0	29,5	32,4	31,4	24,0	24,2	22,1
Compostaje	6,0	4,0	7,0	7,4	8,5	12,1	15,4	9,9	9,3
Reciclado como materia prima en la industria cerámica	25,0	11,0	13,0	14,7	10,3	9,6	3,4	1,3	1,3
Reciclado como materia prima en la industria cementera	7,0	7,0	6,0	5,1	6,7	7,7	2,0	2,1	3,1
Materia prima en otras industrias	0,5	1,0	1,0	0,8	0,4	0,7	2,2	8,0	1,4
Otros destinos	6,0	8,0	2,0	4,9	3,8	0,7	1,5	4,2	4,2
No indicado	-	-	-	-	-	-	-	-	11,7

La utilización de lodos provenientes de la industria papelera como enmienda de suelos o como componente de un medio de cultivo en la actividad de los viveros puede proporcionar diferentes beneficios. El alto contenido de celulosa de estos lodos mejora la infiltración y las características de retención de agua, estabiliza la estructura del suelo y aumenta la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de nutrientes en suelos poco fértiles (Ou-Yang, 2002).

Con todo ello, uno de los objetivos que se propone el sector papelerero para el período 2015-2017 es el análisis y búsqueda de nuevas vías de valorización de residuos de proceso para mejorar la valorización de los residuos y minimizar el envío a vertedero (Aspapel, 2015).

1.3. LOS SUSTRATOS

Las técnicas culturales aplicadas en la producción de plantas y hortalizas han experimentado cambios rápidos y notables durante las cinco últimas décadas en Europa, y más recientemente en España (Terés, 2001). El suelo es un factor de producción esencial en agricultura. Además de actuar como soporte físico de los cultivos, les proporciona los nutrientes, el aire y el agua que precisan.

La evolución de la agricultura intensiva ha traído consigo el empleo en la actividad agraria de nuevos insumos como son los sustratos de cultivo (Ansorena, 1994). El desarrollo de estos sustratos hortícolas tiene su origen en el cultivo en contenedor. Desde que se introdujo este tipo de cultivo, se planteó la necesidad de un cambio conceptual con respecto al cultivo tradicional en suelo, apareciendo los sustratos, en sus distintas variantes, para sustituir al suelo natural. La importancia del cultivo en sustratos es obvia: la mayor parte de la producción de planta ornamental tiene lugar en contenedores o macetas, y por lo tanto, en sustratos. Del mismo modo que existe un aumento en la demanda de sustratos para el cultivo de hortalizas bajo invernadero en banquetas o sacos (Burés, 1997). Estos medios de producción han resultado básicos para el desarrollo de actividades como semilleros, viveros, horticultura intensiva protegida, etc. Asimismo, existen otros usos para los que son igualmente importantes como la jardinería y el paisajismo (Real Decreto 865/2010).

Un **sustrato** en horticultura es todo material sólido distinto del suelo *in situ*, natural o de síntesis, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando un papel de soporte para la planta. El sustrato puede intervenir activamente o no en el proceso de la nutrición vegetal (Abad *et al.*, 2004).

Según Abad *et al.* (2004), las principales razones de la sustitución del suelo por sustratos han sido:

- La necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro.
- La existencia de factores limitantes para los cultivos intensivos en suelo natural, principalmente salinización, enfermedades, agotamiento de los mismos, etc.
- La intensificación cultural que facilita el cultivo en sustrato al permitir un control riguroso del medio radical, particularmente de aspectos relacionados con el suministro de agua y nutrientes.

Según el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sólo podrá ser considerado como sustrato de cultivo el que reúna los siguientes requisitos:

- Que permita el desarrollo de las plantas de manera eficaz
- Que se disponga de métodos adecuados de toma de muestras y de análisis y de ensayo para comprobar sus características y cualidades
- Que, en condiciones normales de uso, no produzca efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente
- Que no sea portador de plagas ni patógenos causantes de enfermedades de los vegetales.
- Que esté libre de semillas y propágulos de malas hierbas.

La eficiencia de las plantas cultivadas en contenedor aumenta cuando el agua del sustrato se haya retenida a bajas tensiones (Burés, 1997). Las raíces de las plantas en recipientes están más expuestas a las fluctuaciones de sus condiciones ya que la relación entre el área y el volumen de estos recipientes es considerablemente grande, por lo que tienen poca capacidad amortiguadora con las variaciones de las condiciones del medio (Pire, 2003). Por tanto, el sustrato de cultivo requiere estar constituido por un material poroso, en el que se desarrolla el sistema radicular de la planta, y del que ésta toma el agua, los nutrientes que necesita para su desarrollo y el oxígeno necesario para el funcionamiento correcto del sistema radicular.

Desde el punto de vista físico, son dos los factores principales que diferencian a los sustratos de los suelos naturales y los hacen adecuados para el cultivo en contenedor (Red Española de Compostaje, 2015):

- Los sustratos poseen generalmente mayor porosidad, ya que tienen poros dentro de sus partículas, además de los interparticulares, que son los que permiten aumentar el espacio poroso respecto del suelo natural.
- Los sustratos tienen un porcentaje más elevado de poros de gran tamaño.

Por las dos indicaciones anteriores, los sustratos retienen el agua con menor fuerza. Por ello las tensiones a las que se considera agua disponible son mucho menores.

En cuanto al sector profesional de sustratos de cultivo, la crisis económica que venimos padeciendo le ha afectado doblemente: por un lado, se ha producido una notable reducción de las ventas, especialmente en el ámbito de la jardinería y de la producción de planta ornamental; por otra parte, el incremento de los costes de determinadas materias primas, que

tradicionalmente se venían usando como componentes de sustratos ha impulsado la búsqueda de nuevos subproductos y residuos que posean unas adecuadas propiedades físicas, químicas y biológicas, a un precio competitivo (Ansorena, 2014).

Paralelamente, tanto la nueva legislación europea como la estatal vienen promoviendo decididamente la valorización de los residuos en condiciones medioambientalmente apropiadas (Ansorena, 2014).

Con todo ello, son muchos los materiales que se están aprovechando como sustratos de cultivo, la mayoría de los cuales eran considerados como residuos no deseables (p.ej., lodos de depuradora) o subproductos de escaso valor (p.ej., cortezas de árboles). En muchos casos, además de resultar útiles y rentables, contribuyen a cerrar el ciclo natural de la materia orgánica y los nutrientes.

1.3.1. Cultivo de semilleros y plantas en maceta. Búsqueda de sustratos alternativos

Entre los diferentes materiales empleados en la formulación de los medios de cultivo de semilleros y plantas en maceta, las turbas *Sphagnum* han sido los más importantes y más utilizados durante muchos años (Domeño, 2009). Turba es un nombre genérico que se aplica a diversos materiales que proceden de la descomposición de los vegetales cuya composición depende de su naturaleza, del origen botánico, y de las condiciones climáticas predominantes durante su formación, que determinan a la vez el estado de descomposición (Burés, 1997). Las turberas son hábitats de escasa representación a nivel mundial, ocupando unos 420 millones de hectáreas, lo que supone algo menos del 3% de la superficie terrestre, de los cuales el 75% se distribuyen entre los países bálticos, Rusia y Canadá, disminuyendo drásticamente su presencia en la llamada Cuenca Mediterránea, y por lo tanto en la Península Ibérica, quedando relegadas a alta montaña. Por su valor, es conveniente destacar la necesidad de protección y conservación para el futuro de estos ecosistemas, por su importancia ecológica, la especial flora que los coloniza y la fauna que los habita y por su papel en la regulación de los sistemas hidrológicos de las áreas en las que se ubican (Red Española de Compostaje, 2015).

Así en la actualidad se ha emprendido una activa búsqueda de materiales alternativos y/o sustitutivos de estas turbas en numerosas partes del mundo, debido sobre todo a:

- El elevado precio de la turba de calidad, particularmente en países sin recursos locales de turba *Sphagnum*.
- Su cuestionable disponibilidad futura por motivos ecológicos, ya que las reservas de turba no son renovables.

Esto ha conducido a la utilización de materiales orgánicos alternativos de la turba, autóctonos y con disponibilidad local. Uno de los ámbitos de búsqueda de sustratos alternativos son los procedentes de las actividades agrícolas, industriales y urbanas. La mayoría de estos materiales deben experimentar un proceso de compostaje o estabilización para su adecuación como sustratos: cáscara de arroz, paja de cereales, desechos de lino, fibra de coco, orujo de uva, orujo de aceituna, corteza de árboles, fibra de madera, serrín y virutas de madera, corcho, acículas de pino, compostaje de champiñones, residuos sólidos urbanos, lodos de depuradoras, algas, plantas marinas, restos de poda, etc. (Ramos, 2005).

A continuación se presentan algunos ejemplos de trabajos científicos y técnicos en los cuales se analiza la respuesta de diferentes materiales autóctonos como sustratos de cultivo.

Mendoza (2010) estudió las características y propiedades de un compost y dos vermicompost con vistas a la aplicación de dichos materiales como sustratos o componentes de sustratos para la producción de plantas en contenedor. La mezcla de residuos de partida utilizada en la producción de dichos sustratos estuvo compuesta por restos de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) y cáscara de almendra (*Prunus dulcis*) en la proporción 75:25 (v:v). Para llevar a cabo la evaluación agronómica de los tres sustratos se realizaron tres experimentos: uno de germinación, otro de estaquillado y uno de producción de plantas adultas de ocho especies ornamentales. Dichos experimentos pusieron de manifiesto que los materiales estudiados podían utilizarse con éxito como sustitutivos parciales de los materiales usados generalmente como sustratos en viveros comerciales.

López-Cuadrado *et al.* (2007) evaluaron el comportamiento de diversos materiales reciclados como sustratos de cultivo, para lo cual plantearon un ensayo en contenedor con *Dianthus caryophyllus* variedad “Maldives” como planta ornamental indicadora. Para realizar el ensayo utilizaron diferentes sustratos: restos de poda, compost agotado de champiñón, cortezas de pino de diferente origen y con distintas proporciones de turba, sustrato comercial ampliamente utilizado en el sector de planta ornamental y una mezcla empleada como testigo. El ensayo puso de manifiesto que con los sustratos alternativos estudiados se obtienen buenos resultados de producción, incluso mejores que los del sustrato testigo. De esta forma, se consigue el objetivo de revalorizar los subproductos elegidos y minimizar el impacto medioambiental que supone el uso exclusivo o mayoritario de turba como componente de sustrato.

Por su parte, Castro *et al.* (2014) en su investigación evaluaron la producción micológica de *Lepista nuda*, una seta comestible, desarrollada en sustrato de hojas de olivo para ser aplicada

como un sistema de aprovechamiento medioambiental sostenible de la biomasa generada por las almazaras. Para ello introdujeron 400 gramos de hoja de olivo, pasteurizada y escurrida, en cajas de poliestireno expandido blanco y con tapa. Posteriormente se inocularon las cajas a razón de 250 gramos de semilla por envase y se incubaron a 22°C, en oscuridad y en una sala ventilada. Los resultados finales corroboraron las hipótesis iniciales ya que, al cabo de cuatro semanas tras la inoculación del micelio, todo el sustrato quedó invadido y colonizado por el hongo, tras lo cual comenzó la fase de fructificación.

Estos son sólo algunos ejemplos de una gran cantidad de artículos en los que se evalúa con éxito la posibilidad de utilizar restos orgánicos de diferentes industrias o actividades locales como componente de sustratos de cultivo para producción de plantas de calidad.

A pesar de su éxito, estos materiales alternativos no se suelen utilizar solos como sustitutos de la turba, ya que raramente un material alternativo reúne por sí solo las características requeridas para unas determinadas condiciones de cultivo. En la mayoría de los casos, se recurre a mezclas de varios materiales (Domeño, 2009).

Los materiales únicos se utilizan en sistemas de tipo hidropónico, donde un control riguroso del abonado y del riego suple las posibles deficiencias de los materiales empleados. Sin embargo, en cultivo de planta ornamental en macetas, este control riguroso resulta de difícil aplicación por la necesidad de cultivar en una misma explotación muy diversas especies, de modo que pocas veces pueden aportarse a éstas las dosis de abono y de agua óptimas. Por otra parte, las plantas que se comercializan en maceta, requieren que el sustrato tenga una cierta capacidad tampón tanto de la nutrición como de la retención de agua, es decir, que debe ser capaz de soportar niveles infraóptimos de fertilizantes y agua (por ejemplo, durante el transporte o la comercialización) sin que la planta sufra desperfectos, siendo en general conveniente que estos sustratos tengan una capacidad elevada de intercambio catiónico y una retención de agua elevada (Burés, 1997).

En la práctica, para valorar la calidad de un sustrato no basta con conocer las propiedades generales de sus principales componentes, sino que es necesario determinarlas para cada mezcla particular, ya que las variaciones suelen ser importantes (Ansorena, 1994). En la caracterización de sustratos se suelen distinguir tres tipos de propiedades: físicas, químicas y biológicas. La importancia del conocimiento de estas propiedades radica en que de ellas dependerá el manejo adecuado de la fertilización y del riego y por lo tanto, el éxito del cultivo.

1.3.2. Propiedades de los sustratos

Las características que debe reunir un componente o sustrato de cultivo, varían en función de las necesidades del material vegetal a utilizar (especie, variedad, etc.), del objetivo del cultivo (multiplicación, producción de planta, producción de fruto o producción de flor cortada), de los medios de control disponibles en la explotación (estructuras de protección del cultivo, sistemas de control de la solución nutritiva o sistemas de control de riego) y por último de la incidencia de múltiples factores no controlados por el agricultor (factores climáticos, posibilidad de fallos en los sistemas de control, etc.) (Red Española de Compostaje, 2015). Por tanto, la idoneidad de un sustrato estará supeditada al manejo de éste y no podrá ofrecer por sí sola garantías del éxito de un cultivo (Burés, 1997).

En la Tabla 3 se resumen las características más deseables para un sustrato, en cuanto a su aptitud para la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas.

Tabla 3 - Características más deseables para un sustrato (Fuente: elaboración propia con datos de Ramos, 2005)

PROPIEDADES FÍSICAS
Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible
Suficiente suministro de aire
Adecuada distribución del tamaño de partículas
Baja densidad aparente
Elevada porosidad
Estructura estable, que impida la contracción (o hinchazón del medio)
PROPIEDADES QUÍMICAS
Bajo o apreciable capacidad de intercambio catiónico, dependiente de que la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente, respectivamente
Suficiente cantidad de nutrientes asimilables, a no ser que se desee contar con un sustrato inerte
Baja salinidad
Elevada capacidad reguladora para mantener constante el pH
Mínima velocidad de descomposición
OTRAS PROPIEDADES
Ausencia de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos y sustancias fitotóxicas
Reproductividad y disponibilidad
Bajo coste
Facilidad de mezcla
Facilidad de desinfección y estabilidad frente a la desinfección
Resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales

1.3.2.1. Propiedades físicas de los sustratos

Entendemos por propiedades físicas aquellas que podemos ver y sentir. Son muy importantes ya que una vez que el sustrato está colocado en el contenedor y la planta está creciendo en él, es prácticamente imposible modificar dichas características. Para cumplir correctamente sus funciones de regulación del suministro de agua y aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad y alta capacidad de retención de agua, unidos a un drenaje rápido y una buena aireación (Ansorena, 1994).

Así, las propiedades físicas más importantes que permiten evaluar la capacidad de un material como sustrato son:

DENSIDAD APARENTE (D_A)

La densidad aparente (D_A) se define como la relación entre la masa del material sólido seco y el volumen ocupado por el material húmedo- es decir, considerando el volumen poroso existente entre las partículas de éste- en unas condiciones de humedad normalizadas, expresada generalmente en g/cm^3 o kg/m^3 (Mendoza, 2010). Este parámetro es importante en el manejo del cultivo de plantas en contenedor ya que lo normal es que se produzca el transporte de sustratos y contenedores y, en este sentido, una baja densidad aparente resulta muy conveniente. Por otro lado en contenedores pequeños puede suceder que la falta de peso provoque que el contenedor vuelque, por ejemplo cuando se cultiva al aire libre en viveros de planta ornamental. Además no hay que olvidar que el sustrato ha de proporcionar anclaje a la planta. Si ésta es de porte alto el sustrato deberá ser firme para un mejor anclaje (Red Española de Compostaje, 2015).

Los valores de densidad aparente óptima dependerán de si se cultiva en invernadero, donde la planta no está sometida al viento y la densidad aparente puede ser tan baja como $0,15 \text{ g/cm}^3$ (Abad *et al.*, 1993), o al aire libre, dónde el sustrato deberá ser más pesado y la densidad aparente deberá estar comprendida entre $0,50$ y $0,75 \text{ g/cm}^3$ (Red Española de Compostaje, 2015).

DENSIDAD REAL (D_R)

La densidad real (D_R) o densidad de partícula (D_p) es la relación entre la masa del material sólido seco y el volumen real ocupado por las partículas que lo forma- es decir, excluyendo el volumen poroso entre las mismas -, expresada generalmente en g/cm^3 o kg/m^3 (Mendoza,

2010). Su valor es propio del material y, a diferencia de D_A , no depende del grado de compactación ni del tamaño de partícula (Ansorena, 1994).

ESPACIO POROSO TOTAL (EPT)

La porosidad es la cuantificación del espacio ocupado por poros en un sustrato. Normalmente se expresa como porcentaje respecto al volumen aparente del sustrato, que es el volumen que ocupa un sustrato incluyendo la materia sólida y los poros internos o externos, tanto los abiertos como los cerrados (Burés, 1997).

Puede ocurrir que la porosidad sea intraparticular y que los poros sean cerrados, sin comunicación posible entre el poro del interior de la partícula y los poros exteriores. La presencia de una gran proporción de este tipo de poros, aunque aporta ligereza al sustrato, no influye en la distribución del agua y el aire en el sustrato. Si la porosidad es intraparticular y el poro es abierto, es decir, con comunicación con poros interparticulares, el poro sí que participa en el suministro de agua a la planta (Fornes *et al.*, 2003).

CONTENIDO DE AGUA

Los sustratos en contenedor han de tener una elevada capacidad de retención de agua, ya que el volumen del medio de cultivos es pequeño, en relación con las pérdidas elevadas de agua por evapotranspiración (Red Española de Compostaje, 2015). Se dice que un suelo natural se encuentra a *Capacidad de Campo* cuando cesa el drenaje, tras haber sido saturado con agua. En estas condiciones, es capaz de retener durante un cierto tiempo en agua absorbida. Análogamente, en sustratos se define la *Capacidad de Contenedor* como la cantidad de agua retenida por un sustrato alojado en un contenedor, una vez que ha sido saturado con agua y dejado drenar libremente (Ansorena, 1994).

Pero no es suficiente con que la cantidad total de agua contenida en un medio de cultivo sea la necesaria para la planta, ya que puede estar retenida con una fuerza muy elevada, superior a la de succión que es capaz de ejercer la planta. Interesa, por tanto, más que la cantidad total de agua retenida por un sustrato, la capacidad de retención de Agua Disponible (AD). Esta se define como la cantidad de agua retenida por el sustrato entre su Capacidad de Contenedor y el punto de marchitez permanente, en que la planta es incapaz de extraer más agua del medio (Ansorena, 1994). Su valor óptimo varía entre el 24 y el 40% del volumen del sustrato (Abad *et al.*, 1993).

Por analogía con los suelos naturales, en los sustratos se utiliza principalmente el método gravimétrico para determinar la humedad y se suele tomar como contenido de agua la cantidad de agua que se pierde al secar un sustrato a 105°C hasta peso constante. Sin embargo, la materia orgánica que forma la componente sólida de sustratos presenta problemas en su secado a esta temperatura. En la materia orgánica pueden existir algunos líquidos volátiles distintos del agua y pueden tener lugar oxidaciones o descomposiciones que dan lugar a imprecisiones en la medida. Muchos laboratorios secan los sustratos orgánicos a temperaturas entre 50 y 60°C (Burés, 1997).

1.3.2.2. Propiedades químicas de los sustratos

pH

Aunque la mayoría de las plantas pueden sobrevivir con amplios márgenes de pH en el sustrato, su calidad varía si este se aleja de los valores óptimos por lo que es importante que el sustrato presente el pH adecuado (Burés, 1997). El pH produce efectos sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (los sitios de adsorción de cationes están ocupados por protones a pH ácido) y la actividad biológica. Entre 5 y 6,5 la mayoría de los nutrientes están en su máximo nivel de asimilabilidad, a pH por debajo de 5 se pueden presentar deficiencias de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio o boro y a pH por encima de 6,5 disminuye la asimilabilidad de fósforo, hierro, manganeso, zinc y cobre. Los óxidos de algunos metales son solubles a pH por debajo de 5 y pueden resultar fitotóxicos (Red Española de Compostaje, 2015).

Por tanto, es importante tener en cuenta el pH y realizar un ajuste del mismo si este está fuera del intervalo recomendado (Domeño, 2009).

SALINIDAD Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

La conductividad eléctrica se refiere a la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. Cuando es elevada hace disminuir la diferencia de potencial osmótico entre el sustrato y los tejidos de la planta y así impide la absorción de agua por las raíces, pudiendo provocar estrés hídrico. También produce fenómenos de toxicidad por la absorción excesiva de Cl^- y de Na^+ . Aunque el Cl^- es un nutriente esencial, la planta lo necesita en cantidad muy baja. Su exceso produce clorosis y necrosis en los márgenes de las hojas en plantas sensibles. El Na^+ , que no se considera nutriente esencial, provoca desequilibrios nutricionales al impedir la absorción de otros nutrientes por competición. Así puede provocar

carencias de elementos como el manganeso o el calcio cuando la disponibilidad de éstos es baja (Red Española de Compostaje, 2015).

La salinidad puede aumentar una vez que el sustrato está en el contenedor, bien por la presencia de fertilizantes insolubles, bien porque la cantidad de sales que se aportan con el agua de riego sea superior a la absorbida por la planta, o bien cuando el sustrato tiene una elevada Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y se va descomponiendo con el tiempo liberando así nutrientes. Estas situaciones pueden prevenirse conociendo las necesidades requeridas por el cultivo y evitando aplicaciones excesivas de abonos (Domeño, 2009).

La respuesta de las plantas a la salinidad depende de la especie, de su estadio de desarrollo, de las condiciones ambientales y del manejo. La planta es más sensible durante la germinación y en la fase inicial que cuando está más desarrollada (Red Española de Compostaje, 2015).

Bunt (1988) establece los siguientes niveles de salinidad, medida como conductividad eléctrica dSm^{-1} en el extracto de saturación:

- $<0,74$: muy bajo
- $0,75 - 1,99$: apropiado para la germinación de semillas y crecimiento de plántulas
- $2,00 - 3,50$: satisfactorio para la mayoría de las plantas
- $>3,50$: elevado para la mayoría de las plantas

1.3.3. Utilización de lodos como sustrato alternativo

Los lodos son residuos generados procedentes de la depuración de aguas, comunes a la depuración de aguas residuales urbanas y a la depuración de aguas residuales de numerosas actividades industriales, como por ejemplo, la industria papelera. Los destinos habituales de los lodos solían ser los vertederos, o la emisión al mar (Burés, 1997). Estos lodos tienen composición variable según su procedencia pero, mezclados y compostados con materiales aireantes, se pueden utilizar como sustrato de cultivo o como enmiendas en agricultura.

En el caso de la industria papelera, los lodos producidos tienen elevados contenidos de celulosa, carbonato cálcico y caolín. Además, requieren de un control exhaustivo de uniformidad, metales pesados y presencia de microorganismos patógenos. También pueden presentar algún componente fitotóxico derivado de los procesos de producción de papel que impida el desarrollo adecuado del cultivo. Por ello, es conveniente recurrir a procesos de compostaje del material para evitar futuros problemas de fitotoxicidad.

Los lodos se suelen compostar mezclados con corteza de pino, virutas o astillas de madera. Si se utilizan en bajas proporciones en su compostaje o en mezclas con turba u otros materiales para el cultivo decrece la concentración de metales pesados y por lo tanto se reduce su fitotoxicidad. Es conveniente madurar los lodos tras su compostaje para estabilizarlos y eliminar compuestos fitotóxicos (Burés, 1997).

Los lodos con bajo contenido en metales pesados se han utilizado con éxito para el cultivo de plantas de temporada, plantas de hoja, floricultura y ornamentales leñosas en contenedor; sin embargo, no todos los lodos son adecuados para el cultivo de plantas hortícolas comestibles (Burés, 1997).

2. OBJETIVO

Los objetivos fundamentales del presente Trabajo Fin de Máster son:

- Evaluar un lodo deshidratado de una industria papelera como componente de sustratos para cultivo de plantas ornamentales.
- Identificar la proporción máxima de dicho lodo que puede ser incorporada a un sustrato de turba para obtener plantas de geranio (*Pelargonium zonale*) y petunia (*Petunia hybrida*) de calidad.
- Evaluar el efecto del lavado del lodo deshidratado de papelera sobre el crecimiento de plantas ornamentales.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. MATERIAL DE PARTIDA: SUSTRATOS

El material objeto de estudio es un lodo deshidratado procedente de la Papelera Guipuzcoana de Zicuñaga S.A. perteneciente al Grupo Iberpapel, cuya analítica completa se presenta en el Anexo. Dicho lodo presenta una densidad aparente de $0,68 \text{ g/cm}^3$, un pH de 7,3 y una conductividad eléctrica de $999 \text{ }\mu\text{S/cm}$. En cuanto a nutrientes, presenta un 69% de Carbono, ya que está compuesto principalmente por celulosa y, en cambio, no presenta altos niveles del resto de nutrientes, por lo que se deberá completar la nutrición con un aporte adicional. Por último, tiene un 73% de materia orgánica y la mayoría de los elementos traza metálicos que contiene se encuentran entre límites legales normales.



Figura 7 - Aspecto del lodo deshidratado de papelera objeto de estudio

Además, dicho material se mezcló en diferentes proporciones con una turba rubia, encalada, de la marca Pindstrup, con pH= 5,5, sin enriquecer con abono ya que los lodos apenas tenían nutrientes. Dicha turba se encargó específicamente para este ensayo ya que se requería una turba sin fertilizar, para que todos los ensayos partieran más o menos con la misma cantidad de nutrientes.

3.1.1. Lavado del lodo deshidratado de papelera

Las sales son inadecuadas como componentes de sustratos para la producción de viveros y semilleros, ya que las plantas son muy sensibles a la salinidad del medio de cultivo durante las fases iniciales de crecimiento (Carrión et al., 2006). El tratamiento de un sustrato para corregir su exceso de sales se puede conseguir o bien mezclándolo en una cierta proporción con otro sustrato de baja salinidad o bien mediante un lavado con agua o bien mediante ambos procedimientos. La elección de uno u otro procedimiento o ambos dependerá de la salinidad a la que se desee rebajar, de la conveniencia por otros motivos de incorporar otro componente en el sustrato, de razones medioambientales y de sostenibilidad asociadas al consumo y al vertido de agua con un exceso de sales, entre otras razones (Red Española de Compostaje, 2015). De esta manera, el lavado de sustratos es señalado por numerosos estudios como estrategia para reducir de manera eficiente la salinidad de un sustrato a valores aceptables para su utilización para producción de plantas en contenedor, con independencia de los altos valores iniciales de salinidad (Chong, 2005).

Se pueden aplicar diferentes estrategias de lavado de los sustratos con objeto de eliminar las sales solubles en exceso (Abad et al., 2008):

1. Lavado con agua antes de preparar el medio de cultivo
2. Lavado del sustrato una vez que esté colocado en el contenedor con uno o varios riegos (con agua o solución nutritiva) previos al cultivo
3. Lavado mediante el riego aplicado a las plantas durante todo el período de cultivo, especialmente en contenedores poco profundos.

En nuestro estudio se realizó un lavado con agua antes de preparar el medio de cultivo. Para ello se emplearon 2 bidones de 400 litros, cuya parte inferior se rellenó con grava para que hiciera de filtro y no se taponara la salida con los elementos más finos del sustrato, arrastrados por el agua de lavado. Además, sobre la grava se colocó una malla para evitar el paso del sustrato a la grava y para facilitar la extracción final del sustrato de los bidones (Figura 8). Cada

bidón se llenó con unos 120 litros de sustrato y se añadió la misma cantidad de agua. Se realizaron un total de 4 lavados sucesivos, de 24 horas cada uno.

Se tomó una muestra de sustrato después de cada lavado para analizar el pH y la conductividad eléctrica y para obtener los extractos para el bioensayo de germinación. Además, también se tomó una muestra del agua que salía del bidón después de cada lavado para analizar su pH y la conductividad eléctrica.

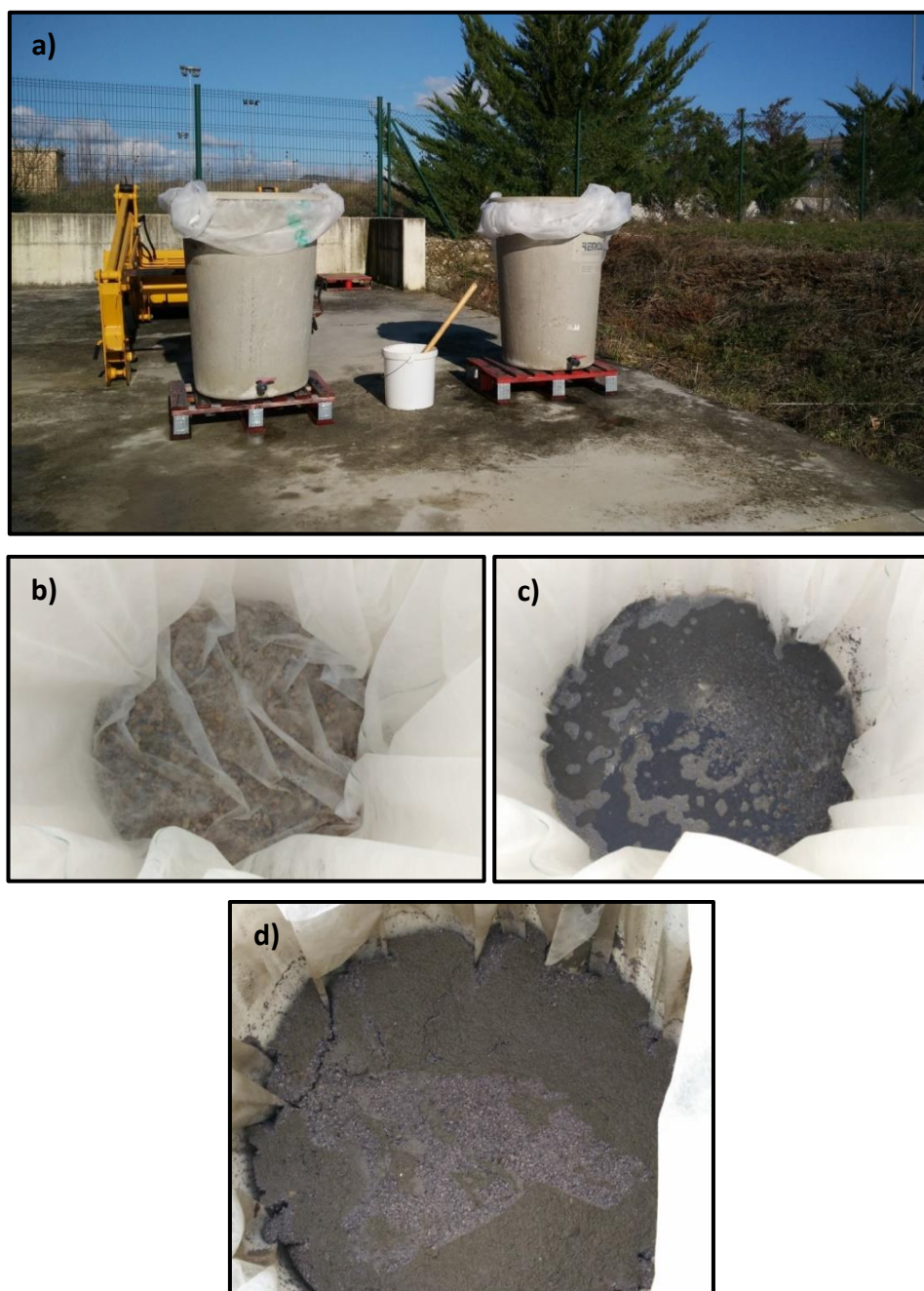


Figura 8 - Proceso de lavado del lodo deshidratado. a) Vista exterior de los bidones utilizados para el lavado. b) Grava y malla colocadas en el interior del bidón. c) Lodo con agua a partes iguales para el lavado. d) Apariencia del lodo una vez drenada el agua de lavado.

3.2. PRUEBAS DE FITOTOXICIDAD: BIOENSAYOS DE GERMINACIÓN

Dado que los sustratos pueden presentar algún tipo de fitotoxicidad debido a su alta conductividad o a la presencia de determinados elementos traza, se realizó una prueba de fitotoxicidad para comprobar dicho parámetro.

Los bioensayos de germinación se basan en la colocación de semillas de una o varias especies vegetales en contacto con el extracto acuoso del material a testar, controlándose la tasa de germinación de dichas semillas y la elongación de las radículas emergidas en comparación con una solución con agua destilada (Zucconi *et al.*, 1981).

Así, se realizaron 6 ensayos de biogerminación siguiendo el protocolo de Zucconi *et al.* (1981) para lo cual se utilizaron semillas de dos especies: berro (*Lepidium sativum*) y lechuga (*Lactuca sativa*).

Las soluciones utilizadas en estos bioensayos fueron las extraídas en los siguientes procedimientos:

- Sustrato sin lavar
- Sustrato con un lavado
- Sustrato con dos lavados
- Sustrato con tres lavados
- Sustrato con cuatro lavados
- Control, con agua destilada

De cada una de las muestras de sustrato se obtuvo un extracto de saturación a partir de una pasta saturada, la cual se realizó tomando unos 500 mL de sustrato al que se le añadió agua destilada agitando con una espátula hasta que el sustrato estuvo saturado, es decir, no quedó agua libre y el sustrato presentó un “brillo metálico”. Una vez obtenida la pasta saturada se dejó reposar durante 24 horas y, después de ese tiempo, se estrujó y se filtró varias veces con papel de filtro hasta obtener el extracto de saturación, libre de partículas en suspensión.

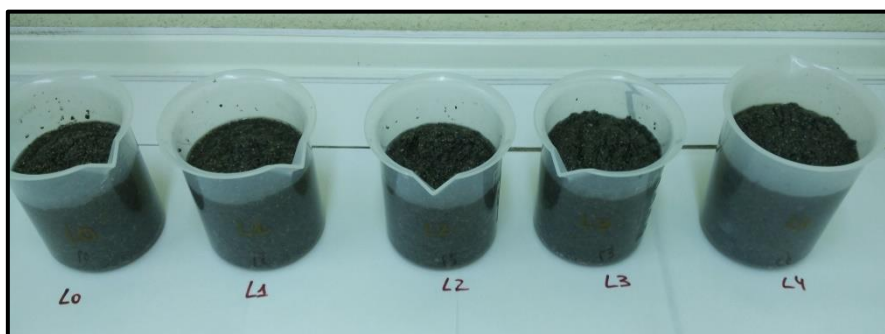


Figura 9 - Pasta saturada de cada una de las muestras analizadas.



Figura 10 - Extracto de saturación obtenido por filtrado de cada una de las muestras analizadas.

A continuación se realizó el bioensayo de germinación, del cual se realizaron 5 repeticiones de cada una de las 6 muestras (5 sustratos y control con agua destilada). Se utilizaron placas Petri sobre las cuales se colocó un papel de filtro humedecido en cada caso con el extracto de saturación correspondiente, o con el agua destilada para el ensayo control. Sobre el papel de filtro humedecido se colocaron 12 semillas por placa de la especie correspondiente (berro o lechuga) y se cubrieron con otro papel de filtro también humedecido con el extracto. En total se añadieron a cada placa unos 2 mL de líquido.

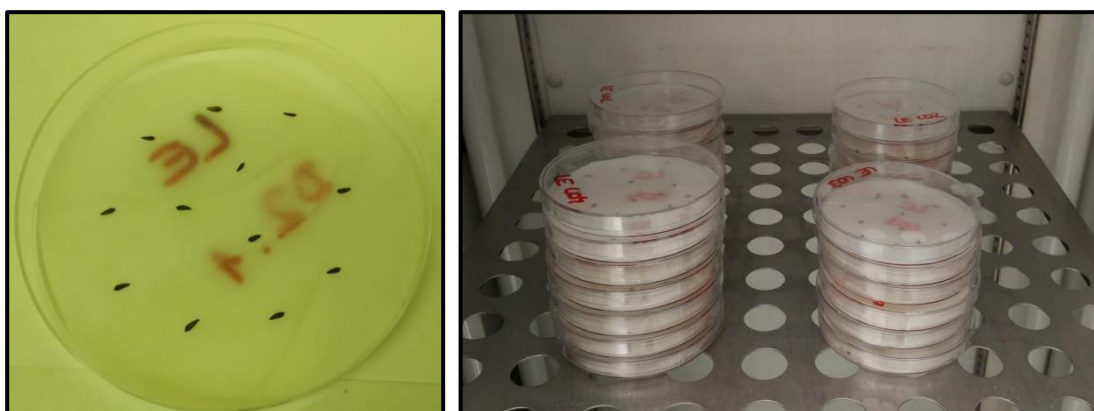


Figura 11 - Izda: Placa de petri sembrada con 12 semillas de lechuga. Dcha: Placas de petri colocadas a germinar en la cámara de germinación.

A continuación se colocaron las placas en cámaras de germinación: las placas de lechuga a una temperatura de 16 °C y en oscuridad durante 5 días, y las de berro a 27 °C y en oscuridad durante 2 días. Por último, se contabilizó el número de semillas germinadas en cada placa, (%G) y se midió la longitud radical con un calibre electrónico (Figuras 12 y 13), para determinar así la longitud media de la radícula (Lm) (Domeño, 2009). Con estos datos se obtuvo el índice de germinación (IGe) mediante la siguiente fórmula.

$$IGe(\%) = \frac{\%G_{extracto} \times Lm_{extracto}}{\%G_{testigo} \times Lm_{testigo}} \times 100$$

Para que un extracto se considere no fitotóxico el IGe debe ser superior a 60 (Domeño, 2009).

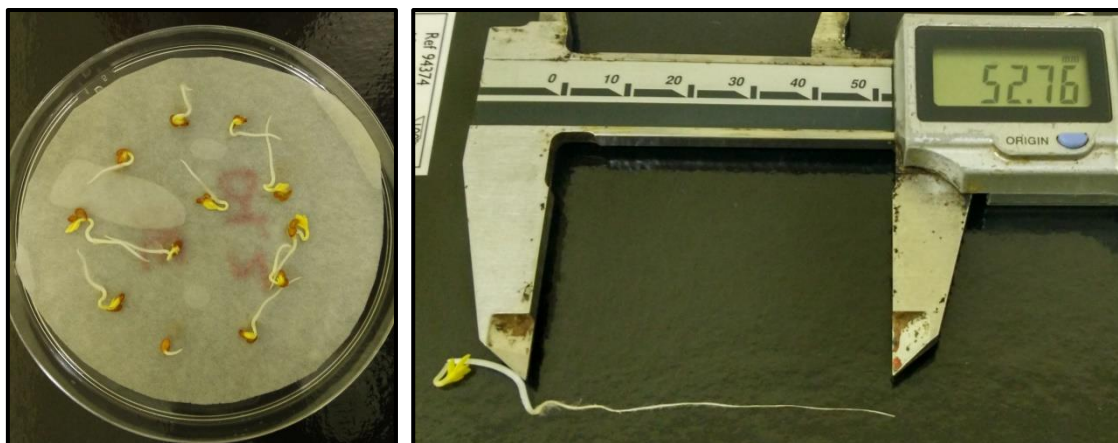


Figura 12 - Izda: Placa de petri con semillas de berro germinadas. Dcha: medida de la longitud radical con un calibre electrónico.

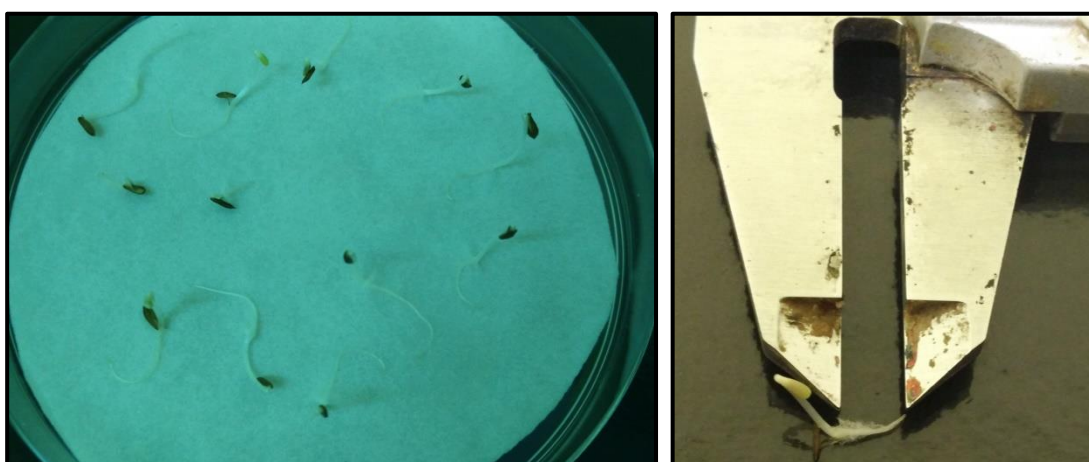


Figura 13 - Izda: Placa de Petri con semillas de lechuga germinadas. Dcha: medida de la longitud radical con un calibre electrónico.

3.3. ENSAYO AGRONÓMICO: CRECIMIENTO DE PLANTAS ORNAMENTALES

El objetivo de este ensayo fue determinar diferencias en crecimiento y apariencia entre plantas de geranio y de petunia crecidas en sustratos con cuatro proporciones distintas de turba comercial descrita anteriormente y lodo deshidratado de papel, en las siguientes proporciones lodo: turba (% v:v): 100:0, 75:25, 50:50, 25:75. Además, en el mismo ensayo se quiso estudiar las diferencias de crecimiento entre plantas crecidas con lodo deshidratado de papel lavado 4 veces y el lodo sin lavar. Por tanto, se formularon así 8 tratamientos (sustratos), además de un tratamiento control con el sustrato de turba comercial.

Como se muestra en la Tabla 4 se han aplicado en total 9 sustratos para cada especie ornamental, siendo el sustrato 5TB el ensayo control.

Tabla 4 - Mezclas obtenidas para el bioensayo agronómico.

Ensayo	Proporción	
	Lodo deshidratado de papel	Turba
1LA	100% lavado	0%
1SL	100% sin lavar	0%
2LA	75% lavado	25%
2SL	75% sin lavar	25%
3LA	50% lavado	50%
3SL	50% sin lavar	50%
4LA	25% lavado	75%
4SL	25% sin lavar	75%
5TB	0%	100%

3.3.1. Preparación de las mezclas

Una vez lavado el sustrato se procedió a realizar las diferentes mezclas de lodo deshidratado de papel y turba para realizar el ensayo agronómico. Las mezclas se realizaron en una hormigonera para conseguir así un sustrato homogéneo.



Figura 14 - Hormigonera utilizada para realizar las mezclas de sustrato

3.3.2. Caracterización de las mezclas

3.3.2.1. Propiedades físicas

DENSIDAD APARENTE (D_A) Y CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA (CRA)

La determinación de estos parámetros se ha realizado mediante una modificación del método propuesto por De Boodt *et al.* (1974) y se han determinado para cada una de las mezclas de la siguiente manera:

Para realizar dicho ensayo se utilizaron cilindros de plástico abiertos por las dos caras, de unos 8 cm de diámetro. En una de sus caras se colocó una malla para que no saliera el sustrato por

su parte inferior y se rellenó cada cilindro con 400cc de cada una de las mezclas propuestas en la Tabla 4, golpeando en la mesa pero sin apelmazar con la mano. Posteriormente se saturó cada muestra con agua destilada y se dejó drenar durante 24 horas sobre una rejilla. Una vez transcurrido dicho tiempo se pesó el conjunto de cilindro, malla y sustrato saturado.



Figura 15 - Izda: Cilindro y malla utilizados para determinar la Capacidad de retención de agua (CRA) de las diferentes mezclas propuestas. Dcha: Muestras saturadas con agua destilada drenando sobre una rejilla.

A continuación, se introdujeron los cilindros en una estufa a 60°C hasta que se alcanzó peso constante y, una vez secas las muestras, se pesaron en una balanza.

Con los valores obtenidos se calculó la humedad (X) – en porcentaje en peso- según la expresión (Mendoza, 2010):

$$X(\%) = \frac{B - C}{B - A} \cdot 100$$

donde:

A = peso conjunto cilindro + malla (g)

B = peso cilindro + malla + sustrato saturado de agua (g)

C = peso conjunto cilindro + malla + sustrato seco 60°C (g)

Mediante la siguiente ecuación se calculó la densidad aparente (D_A) del material:

$$D_A(kg/m^3) = \frac{B - A}{V} \cdot \frac{100 - X}{100} \cdot 1000$$

Por último, la Capacidad de Retención de Agua (CRA) se calculó como:

$$CRA \left(\frac{g \text{ agua}}{100 g \text{ material seco}} \right) = \frac{B - C}{C - A} \cdot 100$$

cuyas variables se han calculado en la determinación de la densidad aparente.

3.3.2.2. Propiedades físico-químicas

pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

Tanto para la determinación del pH como de la CE, se siguió el método de “pasta saturada” para obtener la pasta y el extracto de saturación de la misma forma que en los ensayos de fitotoxicidad (Domeño, 2009).

El pH se determinó en la pasta saturada y en el extracto de saturación con un pHmetro portátil modelo “Hanna HI98128” (Figura 16). Las medidas en la pasta saturada se tomaron en tres puntos de la superficie y se expresó el resultado como el valor medio de las tres determinaciones.

La CE se determinó en el extracto de saturación con un conductímetro portátil modelo “Hanna Dist 6” (Figura 16). Los resultados se expresaron en dSm^{-1} a 20°C .



Figura 16 - pHímetro y conductímetro portátiles utilizados para realizar las medidas de pH y conductividad eléctrica de las muestras.

3.3.3. Ensayos de crecimiento en invernadero

Para el ensayo de crecimiento de plantas ornamentales se utilizaron semillas de petunia (*Petunia hybrida*) y geranio (*Pelargonium zonale*).

El 5 de mayo se sembraron las semillas de geranio y petunia en semilleros de 60 alveolos. Se utilizaron 9 bandejas, una para cada tratamiento, con 60 alveolos cada uno, 30 de los cuales se sembraron con semillas de geranio y los otros 30 con semillas de petunia. Como sustrato se utilizaron directamente las mezclas con las que posteriormente se iban a rellenar las macetas, ya que se pensó que, si se utilizaba turba para todos los semilleros en la fase de germinación, esta podía afectar posteriormente al crecimiento de las plántulas en la maceta de repicado, actuando la turba de cobijo para las raíces si estas no se adaptaban al sustrato de lodo de papel deshidratado.



Figura 17 - Vista general de las bandejas de semillero recién sembradas.

A continuación se cubrieron todos los semilleros con la turba utilizada para el tratamiento control (5TB) y se regaron. Como las noches todavía eran frías, los semilleros se colocaron en un fitotrón con 14 horas de luz a 23°C y 10 horas de noche a 18°C para garantizar la germinación. Los semilleros se cubrieron con un film para mantener la humedad y se regaron manualmente cuando fue necesario, aproximadamente cada 2 días. Para garantizar que todos los alveolos se regaban por igual, se optó por aplicar riego por subirrigación. Para ello se colocaban las bandejas sobre un carro cuya base se llenaba de agua y el sustrato la absorbía por capilaridad de igual forma en toda la bandeja.

Posteriormente, el día 9 de junio los semilleros fueron trasladados a un invernadero de cristal. Tanto el fitotrón como el invernadero estaban ubicados en la Finca de Prácticas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra.

Una vez las bandejas se encontraban en el invernadero, comenzó a regarse una vez al día durante 5 minutos por microaspersión, a las 8 am. El tiempo de riego se modificaba en función de lo cálido o frío que fuera el día.

A partir del día 1 de junio comenzó a realizarse una fertirrigación manual por semana con un Fertilizante Universal comercial, ya que se veían ciertos síntomas de carencias nutricionales en las plantas.

Las plántulas fueron repicadas el día 24 de junio a macetas de 1 L que fueron llenadas con los 9 sustratos expuestos anteriormente. Los riegos de las macetas fueron diferentes en función de la especie: 2 riegos al día de 5 minutos cada uno para los geranios y 2 riegos al día de 10 minutos cada uno para las petunias, también mediante microaspersión, ya que éstas últimas son más exigentes en cuanto al riego.

Al igual que los semilleros, una vez a la semana se realizó una fertirrigación manual de las macetas con un “Fertilizante Universal” comercial.

Dado que durante los meses del ensayo murieron un número importante de plántulas, se realizaron varios controles de mortalidad de las plantas de cada ensayo en fechas intermedias de su crecimiento.

La idea inicial era recolectar todas las petunias cuando las plantas alcanzaran un tamaño comercial y se observaran flores en más del 50% de los tratamientos. Sin embargo, las plantas del tratamiento 5TB fueron bastante más precoces, por lo que hubo que recolectar este tratamiento antes que el resto, ya que las flores estaban comenzando a languidecer e incluso a caerse las más viejas. Así pues, las plantas del tratamiento 5TB se recolectaron el día 2 de agosto y el resto el día 12 del mismo mes. De todas ellas se midieron los siguientes parámetros:

El **peso fresco** (g/planta) de la parte aérea, para lo cual se cortó la planta por la zona superior a las raíces y se pesó en una báscula de precisión. La **altura del vástago**, que se midió desde la zona superior de las raíces hasta la parte más alta de la planta. Además, se contó el **número de hojas** de cada planta, el **número de plantas en floración** y el **número de flores** formadas por planta. Finalmente, se determinó el **peso seco** a 65°C (Mendoza, 2010) de la planta entera. Todos los resultados se expresaron por planta.

Por su parte los geranios se recolectaron el día 19 de agosto, una semana más tarde que las petunias porque éstos todavía no habían florecido. Finalmente salió alguna inflorescencia en algunas plantas del tratamiento 5TB pero hubo que recolectarlas por falta de tiempo para poder presentar los resultados del presente Trabajo Fin de Máster. Por tanto, se realizaron las mismas medidas que en el caso de la petunia excepto los relacionados con la floración.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa “IBM SPSS Statistics 20” para Windows. Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente por medio de Análisis de la Varianza (ANOVA) y, para detectar diferencias entre los distintos tratamientos se utilizó el test de Student-Newman-Keuls. Se consideró un nivel de significación mínimo de $P \leq 0,05$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EFECTO DEL LAVADO DEL LODO DESHIDRATADO DE PAPELERA (LDP)

Como se ha explicado en el apartado de material y métodos, la conductividad eléctrica (CE) puede ser un problema importante al aplicar materiales orgánicos alternativos como sustrato para plantas en maceta. Para remediar este problema, una de las alternativas más eficaces es el lavado del material.

En la Tabla 5 se pueden ver los resultados de pH y CE obtenidos tanto para el lodo deshidratado de papelera (LDP) sin lavar, como de las muestras de sustrato recogidas después de cada uno de los cuatro lavados. El pH se ha medido tanto en la pasta saturada como en el extracto de saturación. La CE se ha medido en el extracto de saturación. Además, se muestran también estos mismos parámetros medidos en el agua recogida después de cada lavado.

Tabla 5 – pH y CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de las muestras de agua y sustrato tomadas después de cada uno de los lavados realizados al LDP.

Muestra*	Agua drenada del lavado		Pasta saturada	Extracto de saturación	
	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
L0	-	-	7,30 c	6,90	1550
L1	6,8	750	7,40 bc	7,19	860
L2	6,6	630	7,43 bc	7,19	620
L3	6,5	420	7,60 ab	7,25	530
L4	6,5	350	7,77 a	7,31	530

* L0=Lodo sin lavar; L1=1 lavado; L2=2 lavados; L3=3 lavados; L4=4 lavados

Vemos que el pH y la CE de las muestras de agua recogida después de cada lavado, va descendiendo conforme aumenta el número de lavados del lodo. En la Figura 18 vemos la evolución de la CE medida en el extracto de saturación de cada muestra de lodo.

Partimos de un material con una CE de 1550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ medida en el extracto de saturación de la muestra L0. Este valor de partida no es alto, según Bunt (1988) entra dentro del rango de CE (250-1990 $\mu\text{S}/\text{cm}$) apropiada para la germinación de semillas. Con cada lavado, la CE disminuye progresivamente hasta obtener un material con una conductividad eléctrica de 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que es un valor realmente bajo. Según estos resultados el material inicial no está cargado de sales, no es un factor limitante, y podría ser utilizado para cualquier propósito de la producción de ornamentales y semilleros. El hecho de hacer disminuir su contenido en sales mediante lavados sucesivos no hace sino mejorar sus condiciones químicas como sustrato.

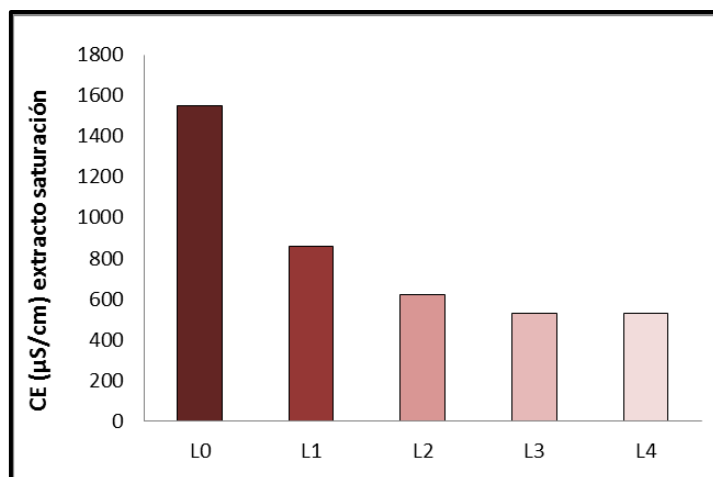


Figura 18 – Evolución de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) medida en el extracto de saturación de cada muestra en relación con los lavados sucesivos del LDP. (L0: LDP sin lavar, L1: LDP lavado una vez, L2: LDP lavado dos veces, L3: LDP lavado tres veces, L4: LDP lavado cuatro veces).

En cuanto al pH de las muestras, aumenta conforme más lavados realizamos (Figura 19), tanto si lo medimos en la pasta saturada como en el extracto de saturación, obteniendo siempre mayores valores de pH si medimos en la pasta saturada. El material de partida (L0) tiene un pH de 6,90 medido en el extracto de saturación, y tras cuatro lavados (L4) se alcanza un valor de 7,31. Este valor es ligeramente alcalino y se aleja de los valores de pH óptimos (ligeramente ácidos), aunque no lo suficiente como para afectar de modo apreciable a la absorción de nutrientes.

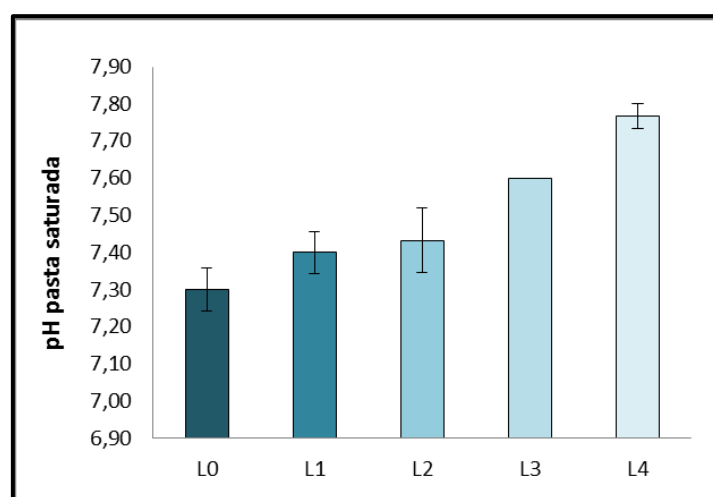


Figura 19 – Evolución del pH medido en la pasta saturada de cada muestra en relación con los lavados sucesivos del LDP. (L0: LDP sin lavar, L1: LDP lavado una vez, L2: LDP lavado dos veces, L3: LDP lavado tres veces, L4: LDP lavado cuatro veces).

El hecho de que aumente el pH con los sucesivos lavados no es normal. Debería suceder lo contrario debido al lavado de sales e iones solubles. Esto podría estar relacionado con el pH y las sales propias del agua que se ha utilizado para el lavado.

Como conclusión, después de realizados los análisis podemos decir que probablemente no hubiera hecho falta realizar tantos lavados del sustrato de partida ya que no tenía una CE excesivamente alta y con un lavado podría haber sido suficiente para quitar el exceso de sales. Además, hubiera sido interesante conocer el pH y la CE del agua de lavado para poder explicar el aumento de pH observado.

4.2. PRUEBAS DE FITOTOXICIDAD: BIOENSAYO DE GERMINACIÓN

Con el fin de evaluar desde el punto de vista biológico las condiciones de germinabilidad del sustrato inicial, el LDP, y de los sustratos resultantes de los sucesivos lavados, se realizó un bioensayo de germinación de semillas y elongación de radícula con el extracto obtenido de la muestra de sustrato recogida después de cada lavado. Dicho bioensayo se desarrolló con objeto de conocer la potencialidad de dicho material como sustrato o componente de sustratos para el cultivo sin suelo, para lo cual se determinó el índice de germinación (IGe, expresado como porcentaje del control) de semillas de berro (*Lepidum sativum*), especie sensible a metales pesados y a compuestos inorgánicos y orgánicos fitotóxicos (Zucconi et al., 1985), y lechuga (*Lactuca sativa*), especie sensible a la salinidad (Mendoza, 2010).

La Tabla 6 muestra los valores del porcentaje de germinación de las semillas (%G), de la longitud media de radícula (Lm, mm) y del índice de germinación (IGe, % del control) obtenidos para berro y lechuga en los extractos acuosos de cada material.

Tabla 6 - Valores de % de germinación (%G), longitud radicular (Lm, mm) e Índice de germinación (IGe) obtenidos en los bioensayos de germinación para cada muestra.

Muestra	Berro			Lechuga		
	%G	Lm (mm)	IGe	%G	Lm (mm)	IGe
L0	85,00	20,72 c*	52,34 c	86,67	3,59 b	31,60 b
L1	95,00	29,29 b	82,39 b	86,67	10,18 a	89,47 a
L2	100,00	35,53 a	105,17 a	95,00	11,20 a	107,95 a
L3	100,00	37,18 a	110,04 a	90,00	11,91 a	108,68 a
L4	100,00	34,87 a	103,20 a	91,67	12,33 a	114,62 a
CO	100,00	33,79 a		95,00	10,38 a	

L0: sustrato sin lavar; L1: sustrato con un lavado; L2: sustrato con dos lavados; L3: sustrato con tres lavados;

L4: sustrato con cuatro lavados; CO: control con agua destilada

* Valores en columna con diferente letra difieren estadísticamente ($P < 0,05$) según el test de comparaciones múltiples de S-N-K

Como puede observarse, el **porcentaje de germinación (%G)** de las semillas de berro se vio afectado por el tratamiento L0 y en menor medida por L1, ya que estos materiales presentaron

menores valores en comparación con el resto. A partir del segundo lavado ya se obtuvieron valores de 100% de germinación. La **longitud de radícula** (Lm) también se vio afectada significativamente por los mismos tratamientos, alcanzando valores medios de 20 mm y 29 mm de longitud radical respectivamente para los tratamientos L0 y L1, en comparación con el resto que superaban los 30 mm de media. Por último, el **índice de germinación** (IGe) presentó diferencias importantes entre los distintos tratamientos, obteniendo un valor de 52,34 para el tratamiento L0 lo que significa que dicho sustrato tiene efectos fitotóxicos en la germinación, según Domeño (2009), ya que el IGe es menor de 60.

En cuanto al ensayo con lechuga, ninguno de los casos ha presentado **porcentajes de germinación** del 100%, pero se aprecian ligeras diferencias entre los distintos tratamientos. Por otro lado sí se han encontrado diferencias significativas en la **longitud de radícula** (Lm) y el **índice de germinación** (IGe). En este caso sólo el tratamiento L0 parece poder tener efectos negativos sobre la germinación de las semillas de lechuga, ya que presenta valores significativamente menores que el resto de tratamientos para ambos parámetros. El IGe de L0 es mucho menor que 60 lo que implica una elevada fitotoxicidad.

Estos resultados son en gran parte contradictorios. Por un lado la CE del LDP sin lavar es baja y apropiada para la germinación de semillas según Bunt (1988), pero realizado el test de germinación aparece claramente el tratamiento L0 (LDP sin lavar) como altamente fitotóxico. Por tanto, el elemento fitotóxico es algún elemento químico soluble presente en el sustrato inicial ya que este casi desaparece con un lavado (L1) y lo hace totalmente con dos lavados (L2). Sería muy interesante realizar un análisis del tipo de iones presentes en el agua del primer lavado para poder deducir cuales pudieran ser el o los elementos fitotóxicos capaces de generar este efecto. En definitiva la fitotoxidad no está causada por la alta concentración de sales (alta CE) sino por el efecto de algún ion, o iones, específicos que generan este efecto negativo.

4.3. ENSAYO AGRONÓMICO: CRECIMIENTO DE PLANTAS ORNAMENTALES

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la potencialidad del uso del LDP como sustrato, o componente de sustratos de cultivo, estudiando su influencia en el crecimiento, desarrollo y floración de las distintas especies ornamentales seleccionadas para el ensayo. Para ello se evaluaron agronómicamente cuatro mezclas distintas de turba comercial y LDP en las siguientes proporciones de LDP: turba; 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 (% v:v). Además, en el

mismo ensayo se evaluaron las diferencias de crecimiento entre plantas crecidas con LDP lavado 4 veces y el LDP sin lavar. Como control se hicieron crecer las plantas en un sustrato 100% turba de la misma que se había utilizado para preparar las mezclas.

4.3.1. Caracterización de las mezclas

Se han determinado sólo las propiedades físicas y químicas que se han considerado de mayor importancia a la hora de caracterizar un sustrato y para las que se disponía de material para su medición.

4.3.1.1. Propiedades físicas

Los resultados de la caracterización física de los sustratos preparados con el LDP y la turba se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 – Caracterización física de las mezclas empleadas en el ensayo. (D_A : densidad aparente; CRA: Capacidad de Retención de Agua)

Mezcla	Humedad (% peso)	D_A (kg/m³)	CRA (g agua/100 g material seco)
1SL*	64,49	278,86	181,60
1LA	57,46	288,72	135,10
2SL	57,78	268,57	136,83
2LA	51,99	282,50	108,27
3SL	55,67	215,88	125,59
3LA	49,15	244,69	96,66
4SL	54,70	180,12	120,77
4LA	48,84	191,45	95,48

*Ver mezclas en Tabla 4, pg. 41.

Como puede observarse, tanto con el sustrato lavado como sin lavar, la mezcla con turba redujo los valores de **densidad aparente** (D_A). Si observamos los datos de las cuatro mezclas en las cuales el LDP está sin lavar (1SL, 2SL, 3SL y 4SL), vemos como ésta disminuye conforme la proporción de turba es mayor, pasando de una D_A de 278,86 kg/m³ para la mezcla 1SL a una D_A de 191,45 kg/m³ para la mezcla 4SL.

Lo mismo ocurre en las cuatro mezclas en las cuales el LDP está lavado, donde la mezcla sin turba (1LA) presenta un valor de D_A de 288,72 kg/m³ y la que mayor proporción de turba tiene (4LA) presenta un valor de D_A de 180,12 kg/m³. Es obvio que el LDP es más denso que la turba.

Ahora si comparamos los valores entre las mezclas con el LDP lavado y sin lavar, vemos que en todos los casos las mezclas en las cuales el LDP está lavado presentan mayores valores de D_A

que las mezcladas con LDP sin lavar. Este hecho se debe a un proceso de encajado, o encastramiento de las partículas más finas dentro de los poros más grandes, provocado por los sucesivos lavados.

En cualquier caso, los valores de densidad aparente de las 8 mezclas están dentro de los intervalos aceptables para sustratos de cultivo ($<400 \text{ kg/m}^3$) (Red Española de Compostaje, 2015).

En cuanto a la **capacidad de retención de agua** (CRA) observamos que cuanto mayor es la proporción de LDP en la mezcla, mayor es el valor de este parámetro.

No se han podido obtener valores de Densidad Real (D_R) y Espacio Poroso Total (EPT) por problemas técnicos con la mufla del laboratorio.

4.3.1.2. Propiedades físico-químicas

Los resultados obtenidos en la caracterización físico-química de los sustratos preparados con el LDP se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8 – Caracterización físico-química (pH y CE) de las 8 mezclas preparadas a base de lodo deshidratado de papelera y turba. (CE: conductividad eléctrica)

Mezcla	Pasta saturada	Extracto de saturación	
	pH	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)
1SL	7,30 b	6,90	1550
1LA	7,77 a	7,31	530
2SL	7,10 c	6,72	1430
2LA	7,27 b	7,15	760
3SL	7,07 c	6,70	990
3LA	7,10 c	6,96	630
4SL	7,10 c	6,62	840
4LA	7,13 c	6,60	540

*Ver mezclas en Tabla 4, pg. 41.

En cuanto al **pH** medido en la pasta saturada se observaron diferencias significativas entre algunas de las mezclas estudiadas. Todos los sustratos presentaron pH alcalinos y ello está relacionado con el proceso de producción del papel que generalmente es un medio alcalino. Las mezclas en las cuales el LDP estaba sin lavar presentaron valores de pH más bajos (menos alcalinos) que los LDP lavados. Como se ha explicado en el apartado 4.1., este resultado no parece lógico pero puede tener relación con el agua de lavado. Por otro lado, el pH disminuía

conforme la proporción de turba era mayor en la mezcla, pasando de un valor de pH de 6,90 para la mezcla 1SL a un valor de 6,62 para la mezcla 4SL. En el caso de las mezclas con el LDP lavado, iba desde un pH de 7,31 para la mezcla 1LA a un valor de 6,60 para la mezcla 4LA. La turba tenía un pH de 5,5, por lo que resulta lógico que a mayor proporción de turba, menor sea el pH.

Según Abad *et al.*, (1993), el pH óptimo de un sustrato para el crecimiento vegetal oscila entre 5,2 y 6,3, intervalo en el cual la mayoría de nutrientes se encuentran disponibles para las plantas. En general, para utilizar un residuo alcalino como sustrato o componente de sustratos resulta necesario realizar una corrección de pH, ya sea mediante la aplicación de algún agente acidificante (enmienda) o bien mezclándolo en proporciones adecuadas con otros materiales ácidos o neutros, especialmente turba encalada. En nuestro caso, ni si quiera la mezcla de 75% turba y 25% papel ha conseguido alcanzar los niveles óptimos de pH, por lo que sería conveniente aplicar algún tipo de enmienda acidificante.

La **conductividad eléctrica** (CE) del material de partida (1SL) no era elevada (1550 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para su uso como sustrato y disminuyó de manera importante hasta 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con los 4 lavados realizados (1LA). A partir de ahí, en el caso de las cuatro mezclas con el LDP sin lavar, la CE disminuyó conforme aumentaba la proporción de turba en la mezcla, alcanzando un valor de 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la mezcla 4SL. En cuanto a las mezclas con el LDP lavado, las mezclas 2LA, 3LA y 4LA presentaron valores mayores de conductividad eléctrica que la mezcla 1LA. Esto puede deberse a que la turba tuviera una conductividad eléctrica mayor derivado del CO_3Ca añadido en fábrica a la turba para neutralizarla y subir su pH (de 3,5 a 6). De todas maneras, en este caso la CE también disminuyó conforme aumentaba la proporción de turba en la muestra, desde los 760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de la mezcla 2LA hasta los 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de la mezcla 4LA. Este proceso se debe a la disminución de la CE del LPD con los sucesivos lavados.

Este ensayo demuestra que se puede disminuir la salinidad de un sustrato, o bien aplicando el método de lavado de las sales en exceso con agua (Carrión *et al.*, 2006), o bien mezclándolo con otros materiales orgánicos o minerales menos salinos (efecto de dilución) como la turba, fibra de coco, perlita y vermiculita, principalmente (Sánchez-Monedero *et al.*, 2004; Bustamante *et al.*, 2008). En nuestro caso hemos utilizado ambos métodos a la vez y quizá no hubiera sido necesario realizar tantos lavados sabiendo la conductividad eléctrica del material de partida, ya que al final hemos alcanzado valores de CE muy bajos.

4.3.2. Ensayo de crecimiento en invernadero

4.3.2.1. Germinación y mortalidad de las semillas

El proceso de germinación se ve afectado por una serie de factores entre los que destaca el sustrato utilizado, cuyas propiedades y características deben garantizar una correcta germinación de la semilla y un adecuado crecimiento de las raíces (Mendoza, 2010).

El diseño estadístico planteado en un principio para el ensayo de crecimiento en invernadero fue un diseño factorial 9x2, con 9 sustratos diferentes (1SL, 1LA, 2SL, 2LA, 3SL, 3LA, 4SL, 4LA y 5TB) y dos especies ornamentales (geranio y petunia), con 3 repeticiones y 10 plantas por repetición, lo que supondría un total de 30 plantas por sustrato y especie y 540 en su conjunto. Sin embargo, desde el principio del experimento hubo problemas con la germinación y la supervivencia de las plantas, llegando en el caso extremo de las petunias crecidas en sustrato 1SL, a no tener ninguna planta al final del ensayo.

Por esta razón, se realizó un seguimiento de la germinación y la mortalidad de las plantas en días intermedios del ensayo, el cual podemos ver en las siguientes Figuras 20 a 23.

En la Figura 20 se presenta la germinación acumulada en el tiempo para las plantas de petunia desde el día 15 de mayo hasta el 6 de junio. El conteo se realizó sobre 30 semillas sembradas en cada tratamiento.

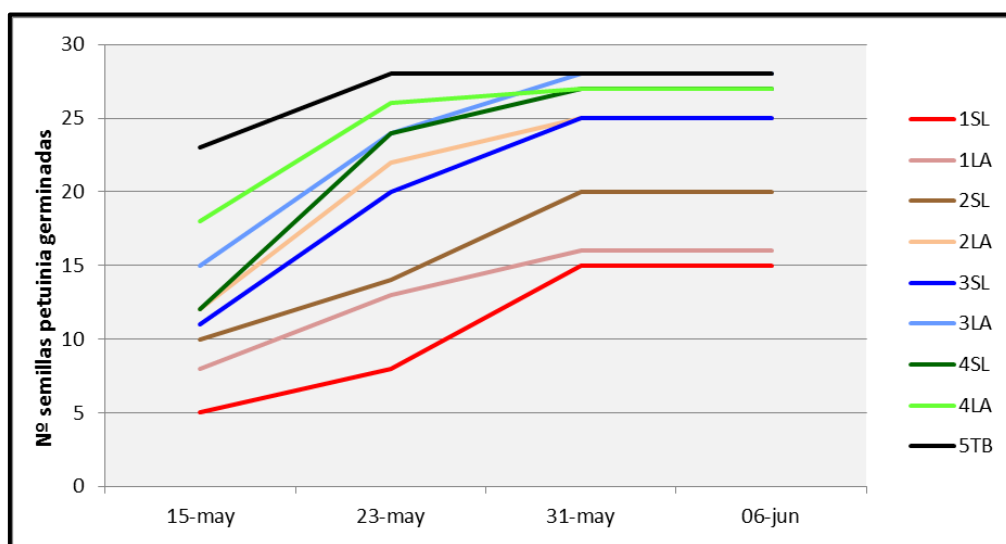


Figura 20 – Seguimiento de la germinación de 30 semillas de petunia de cada tratamiento, desde el día 15 de mayo al día 6 de junio.

Vemos como desde un principio se observaron diferencias importantes de germinación entre los distintos tratamientos. En ningún caso la germinación fue del 100%. Las mezclas con 100% LDP (1LA y 1SL) fueron las que menores tasas de germinación presentaron y, al final del

período, sólo habían germinado la mitad de las semillas sembradas en ambos casos. A partir de ahí, el número de semillas germinadas fue aumentando conforme la mezcla presentaba mayor proporción de turba y el LDP estaba lavado, hasta alcanzar los mayores niveles en la mezcla 5TB la cual tenía 100% de turba y en la cual germinaron 28 semillas de 30 (93,3%).

A partir del 6 de junio, comenzó a verse mortalidad en las plantas de petunia, llegando a morirse el 100% de las plantas en la mezcla 1SL (100% LDP sin lavar). Vemos en la Figura 21 como la mezcla 5TB es en la que menos plantas murieron, obteniendo finalmente 24 plantas para el ensayo de crecimiento de plantas en maceta. En cambio para el resto de mezclas se salvaron menos de la mitad de las plantas.

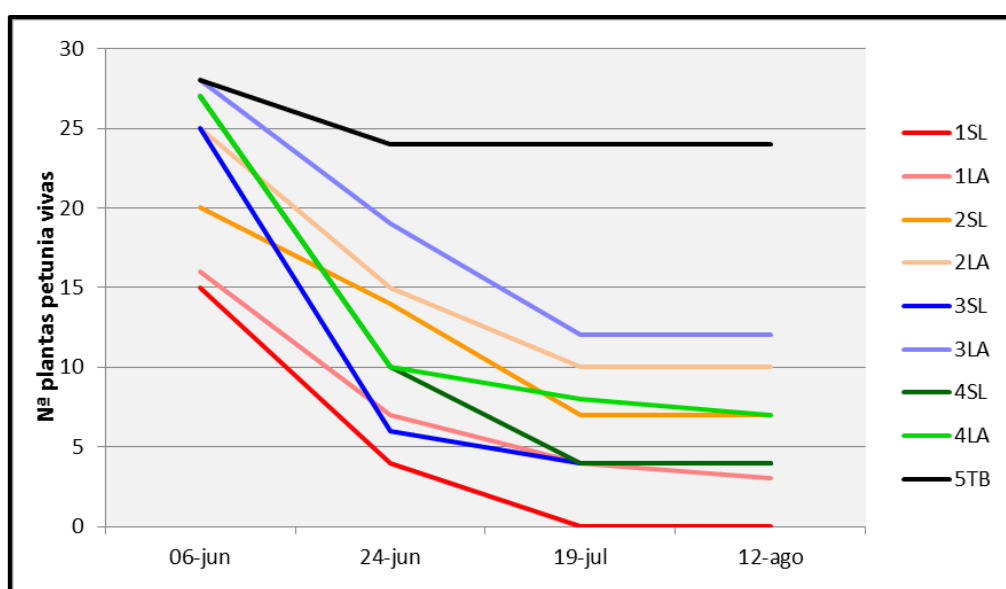


Figura 21 - Seguimiento de la mortalidad de las 30 plantas de petunia de cada tratamiento, desde el día 6 de junio al 12 de agosto.

Por lo general sobrevivieron pocas plantas de la mayoría de tratamientos, pero destacan en este caso los tratamientos 4SL y 4LA, los cuales tenían 75% de turba, y que sólo sobrevivieron 4 y 7 plantas respectivamente. La mezcla que tuvo una mayor tasa de supervivencia, aparte del 5TB, fue el tratamiento 3LA con 12 plantas vivas el 12 de agosto.

En la Figura 22 vemos el seguimiento de la germinación de las plantas de geranio las cuales, en general, alcanzaron mayores tasas de germinación que las petunias. Vemos que de igual manera, los tratamientos con 100% LDP (1SL y 1LA) fueron los que menores tasas de germinación presentaron al principio del ensayo pero, al final del mismo (15 de junio), germinó una semilla más en estos tratamientos que en el 2LA.

Resulta curioso en este caso que los tratamientos en los cuales el LDP estaba lavado no presentaron mayores tasas de germinación que los que tenían el LDP sin lavar, incluso el 2LA y

el 4LA tuvieron una menor tasa de germinación que el 2SL y 4SL respectivamente. En este caso el tratamiento que presentó mayor tasa de germinación fue el 4SL, más incluso que el control con turba (5TB).

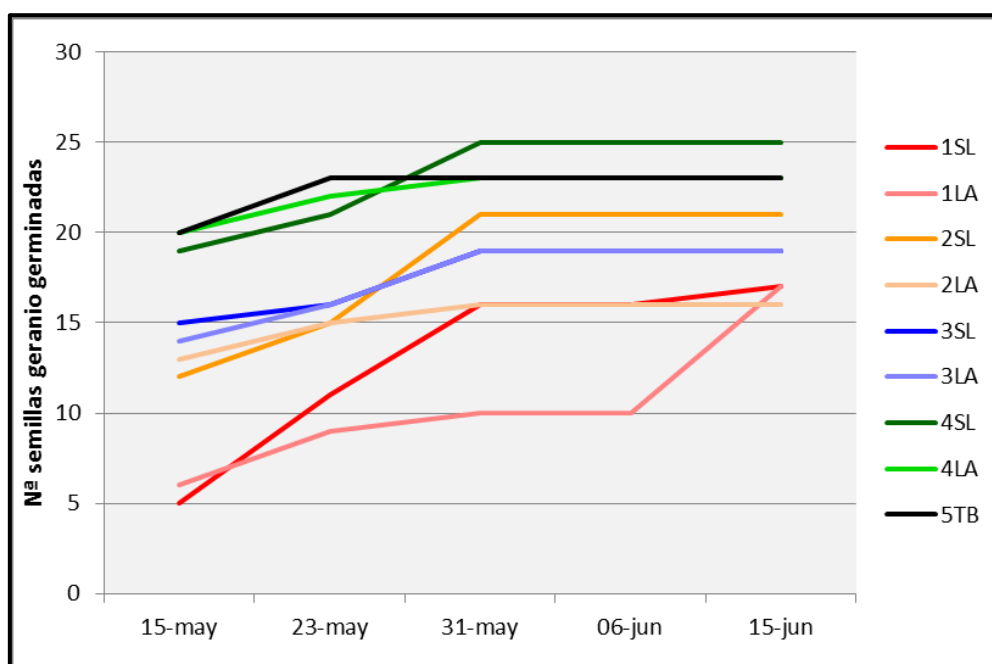


Figura 22 – Seguimiento de la germinación de las 30 semillas de geranio de cada tratamiento, desde el día 15 de mayo al día 15 de junio.

En cuanto a la mortalidad de las planta a partir del día 15 de junio (Figura 23), vemos que los geranios también sufrieron una mortalidad importante, muriendo en todos los tratamientos más de la mitad de las plantas sembradas.

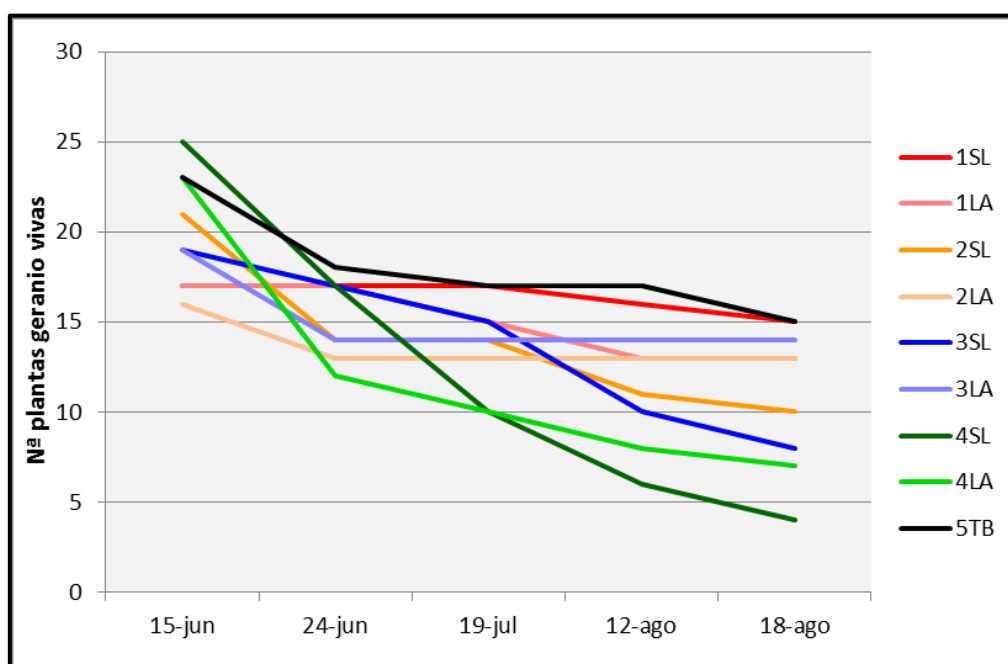


Figura 23 - Seguimiento de la mortalidad de las 30 plantas de geranio de cada tratamiento, desde el día 15 de junio al 18 de agosto.

En este caso vemos que la mortalidad de las plantas no parece seguir un patrón lógico, ya que murieron más plantas en los tratamientos con mayor proporción de turba. Sorprenden igualmente los datos de los tratamientos 4SL y 4LA en los cuales sólo sobrevivieron 4 y 7 plantas respectivamente. Además, en el tratamiento 1SL sobrevivieron 15 plantas, las mismas que para el tratamiento 5TB.

Sin embargo, hay que tener en cuenta la calidad de las plantas que sobrevivieron. Resultó contradictorio que las plantas de los tratamientos 1SL y 1LA no se murieran porque desde un principio presentaron síntomas de fitotoxicidad, con hojas rojas y de aspecto “quemado”, aparte de que no crecían en absoluto. Estuvieron varias semanas estancadas pero vivas.

En cambio, las plantas que sobrevivieron de las otras mezclas crecieron adecuadamente en su mayoría, unas más rápido que otras como veremos en el próximo apartado, pero sin presentar ese tipo de fitotoxicidad que parecían presentar las crecidas en sustrato de 100% LDP. Podemos ver esos síntomas en la Figura 24.



Figura 24 – Síntomas de fitotoxicidad en plantas de geranio. Izda: plantas en semillero con pocos días de crecimiento. Dcha: plantas en maceta al final del ensayo, después de más de 3 meses de crecimiento.

La gran mortalidad presentada en geranio para todos los tratamientos pudo tener relación con la falta de nutrientes inicial que se notó en las plántulas. La turba era no fertilizada y el LDP, como es lógico, no portaba nutrientes. Como en las primeras semanas los sustratos estuvieron sin fertilizar, comenzaron a verse importantes síntomas de carencias en las hojas, lo cual pudo afectar al crecimiento. Por otro lado, la elevada mortalidad pudo ser consecuencia de una fitotoxicidad del LDP o debido a un exceso de riego, ya que las plantas de geranio son bastante tolerantes a la sequía y no al exceso de agua. Puede que los primeros días se regaran demasiado las bandejas de semilleros y que la parte inferior de éstos estuviera encharcada, limitando así la respiración y provocando finalmente la muerte de las plantas.

Por último, a mitad de junio cuando las plántulas tenían un mes de crecimiento aproximadamente, hubo una proliferación de hongos en los alveolos, cuyas esporas creemos venían con el LDP ya que en el las bandejas del tratamiento 5TB no proliferaron. Estos hongos pudieron realizar una importante competencia con las plántulas, las cuales estaban aún en una fase muy sensible, y provocar la mortalidad de algunas de ellas. En la Figura 25 se muestran fotografías de la colonización de las bandejas por hongos.



Figura 25 – Imágenes de la contaminación por hongos que se produjo en algunas bandejas a principios del mes de junio.

4.3.2.2. Crecimiento, desarrollo y floración de las plantas

Petunia hybrida

Los resultados relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas de **petunia** para las distintas mezclas a base de LDP y turba, se presentan en la Tabla 9. Hay que destacar que no sobrevivió ninguna planta de petunia crecida en el sustrato 1SL, por lo que no se presentan resultados para dicho tratamiento.

Tabla 9 – Parámetros de crecimiento y desarrollo de las plantas de petunia para cada una de las mezclas a base de LDP y turba estudiadas. Datos por planta. (PF (g/planta): peso fresco. PS (g/planta): peso seco).

	PF (g)	PS (g)	Altura vástago (mm)	Nº hojas	Nº flores
1SL	-	-	-	-	-
1LA	0,08 c*	0,02 c	8,60 d	5,33 d	0,00 b
2SL	0,38 c	0,05 c	19,21 d	7,00 d	0,00 b
2LA	1,50 c	0,18 c	71,15 c	12,00 d	1,50 b
3SL	1,65 c	0,20 c	63,85 c	13,75 d	0,00 b
3LA	11,74 bc	1,56 b	172,17 b	29,75 c	3,83 b
4SL	18,19 b	1,64 b	173,00 b	38,75 bc	4,25 b
4LA	33,20 a	3,69 a	322,00 a	57,57 a	16,14 a
5TB	37,95 a	4,42 a	322,50 a	51,71 ab	14,17 a

* Valores en columna con diferente letra difieren estadísticamente ($P < 0,05$) según el test de comparaciones múltiples de S-N-K

PESO FRESCO (PF)

La mezcla empleada tuvo una influencia estadísticamente significativa ($p<0,05$) en el peso fresco de la parte aérea (hojas + tallos + flores) de las plantas de petunia, como puede observarse en la Figura 26.

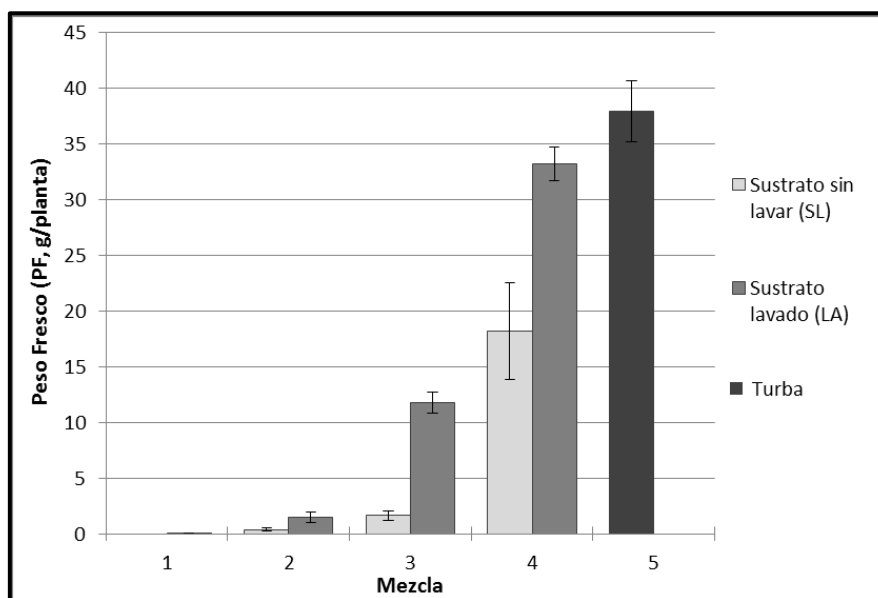


Figura 26 – Valores de peso fresco (PF, g/planta), obtenidos para las plantas de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

Las plantas cultivadas con las mezclas 5TB y 4LA no presentaron diferencias significativas en cuanto al peso fresco en hojas, tallos y flores, alcanzando un PF medio superior a los 30g. En cambio, estas dos mezclas si presentaron valores significativamente superiores a las plantas crecidas en el resto de sustratos. Fueron los tratamientos 1LA, 2SL, 2LA y 3SL los que presentaron valores más bajos de peso fresco, no superando los 2g de media.

PESO SECO (PS)

Al igual que con el peso fresco, la mezcla utilizada tuvo una influencia estadísticamente significativa ($p<0,05$) en el peso seco de la parte aérea (hojas + tallos + flores) de las plantas de petunia, como puede observarse en la Figura 27.

En este caso también fueron las mezclas 4LA y 5TB las que mayores pesos secos presentaron, con un PS medio de 3,69 g/planta y 4,42 g/planta respectivamente, no encontrándose diferencias significativas entre estos dos tratamientos. Además, los tratamientos que menor peso seco presentaron fueron el 1LA, 2SL, 2LA y 3SL, al igual que ocurrió con el peso fresco, no superando ninguno de ellos los 0,2 g/planta.

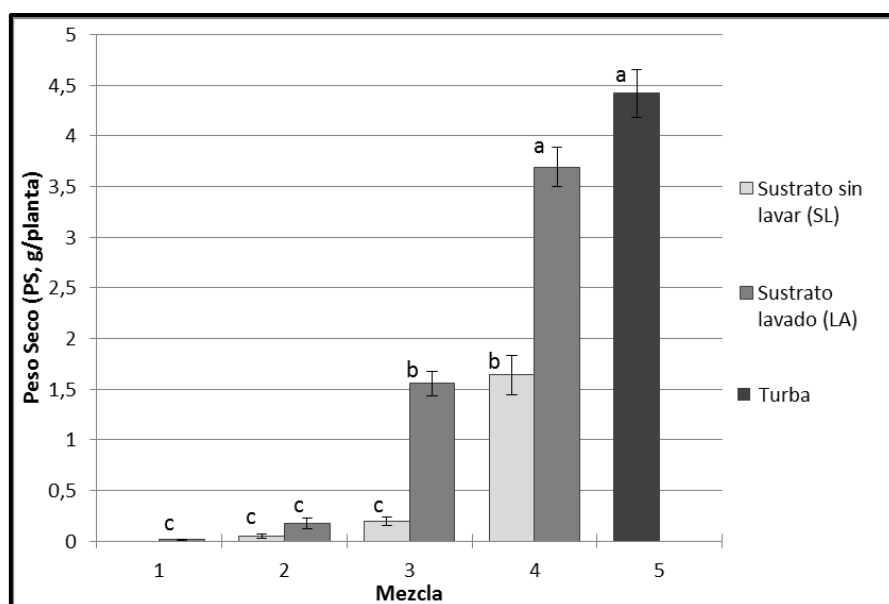


Figura 27 – Valores de peso seco (PS, g/planta) obtenidos para las plantas de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

ALTURA DEL VÁSTAGO (mm)

En cuanto a la altura del vástago, también se observaron importantes diferencias entre los distintos sustratos aplicados. Las plantas de los tratamientos 5TB y 4LA no presentaron diferencias estadísticamente significativas y alcanzaron una altura media mayor a los 30 cm. Los tratamientos 3LA y 4SL presentaron una altura algo menor que los anteriores, sin llegar a alcanzar los 20 cm. Los tratamientos 2LA y 3SL no llegaron a los 10 cm y, por último, los tratamientos que menor crecimiento en altura presentaron fueron el 1LA y 2SL, que no llegaron a los 2 cm.

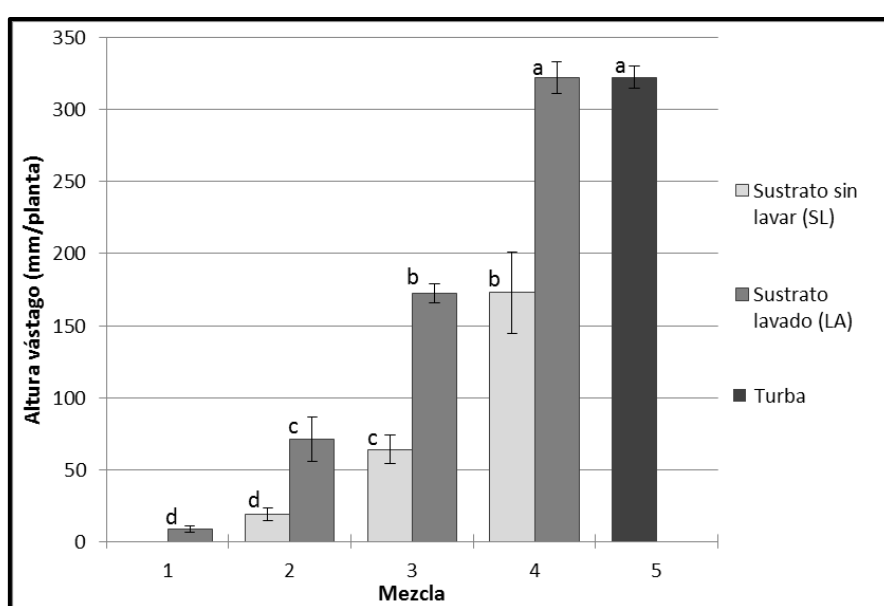


Figura 28 - Altura de vástago (mm/planta) obtenida para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

NÚMERO DE HOJAS

El sustrato aplicado también tuvo una influencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en el número de hojas de las plantas de petunia (Figura 29).

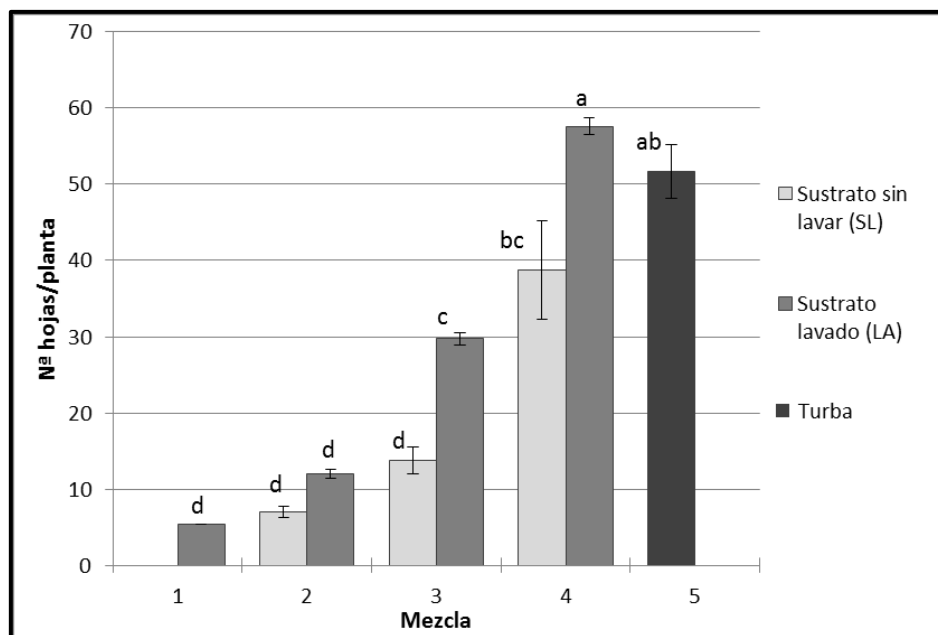


Figura 29 - Número medio de hojas por planta de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

Se observa que, en este caso, las plantas cultivadas con el sustrato 4LA presentaron la mayor producción de hojas por planta al final del ciclo, alcanzando valores superiores a las 50 hojas por planta, aunque este tratamiento no tuvo diferencias significativas con el 5TB.

Los tratamientos 1LA, 2SL, 2LA y 3SL fueron los que presentaron menor número de hojas por planta al final del ciclo de cultivo, con valores cercanos a las 10 hojas por planta.

NÚMERO DE FLORES

Por último, las diferencias entre los distintos tratamientos en cuanto al número de flores por planta son realmente importantes, siendo los tratamientos 4LA y 5TB los que mayor número de flores presentaron al final del ciclo, con 16 y 14 flores de media por planta respectivamente.

El resto de tratamientos tuvieron muchas menos flores, con valores menores a 4 flores por planta.

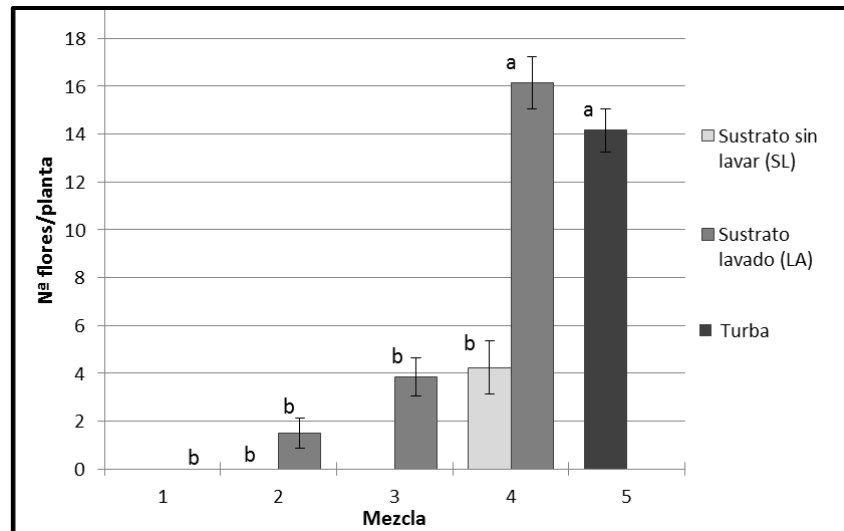


Figura 30 – Número medio de flores por planta de petunia para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

En las Figuras 31 a 33 se muestran visualmente las diferencias encontradas en el crecimiento de plantas de petunia entre las distintas mezclas empleadas.

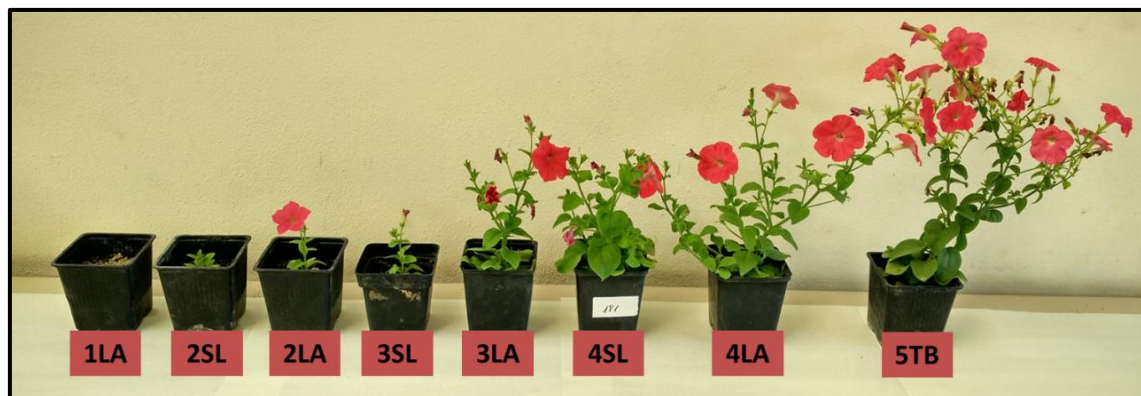


Figura 31 - Comparación entre plantas de petunia crecidas en cada uno de los sustratos ensayados.



Figura 32 – Comparación entre plantas de petunia crecidas en cada uno de los sustratos en los cuales el LDP estaba lavado.



Figura 33 – Comparación entre plantas de petunia crecidas en cada uno de los sustratos en los cuales el LDP estaba sin lavar.

Como se ha comentado en el apartado de material y métodos, las plantas del tratamiento 5TB se recolectaron 10 días antes que las del resto de tratamientos. Por lo tanto, a pesar de que en los resultados no se aprecian diferencias significativas de crecimiento entre los tratamientos 4LA y 5TB, hay que tener en cuenta que las plantas del tratamiento 4LA tuvieron 10 días más de desarrollo, por lo que ésta mezcla parece ser adecuada para el crecimiento de plantas de petunia de calidad, pero más tardía que con un sustrato 100% turba.

Pelargonium zonale

Los resultados relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas de **geranio** para las distintas mezclas a base de LDP y turba, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 - Parámetros de crecimiento y desarrollo de las plantas de petunia para cada una de las mezclas a base de LDP y turba estudiadas. Datos por planta. (PF (g/planta): peso fresco. PS (g/planta): peso seco).

	PF (g)	PS (g)	Altura vástago (mm)	Nº hojas	Nº flores
1SL	0,22 c*	0,03 c	19,83 d	4,47 c	0,00 b
1LA	0,26 c	0,05 c	25,18 d	5,00 c	0,00 b
2SL	0,40 c	0,05 c	26,47 d	5,00 c	0,00 b
2LA	0,58 c	0,07 c	31,59 d	6,08 c	0,00 b
3SL	0,62 c	0,08 c	29,18 d	4,88 c	0,00 b
3LA	1,20 c	0,13 c	45,25 c	6,71 c	0,00 b
4SL	4,83 c	0,80 bc	53,43 c	8,50 c	0,00 b
4LA	10,46 b	1,44 b	85,93 b	13,29 b	0,00 b
5TB	30,87 a	5,70 a	133,93 a	25,33 a	3,60 a

* Valores en columna con diferente letra difieren estadísticamente ($P < 0,05$) según el test de comparaciones múltiples de S-N-K

PESO FRESCO (PF)

La mezcla empleada tuvo una influencia estadísticamente significativa ($p<0,05$) en el peso fresco de la parte aérea (hojas + tallos + flores) de las plantas de geranio, como puede observarse en la Figura 34.

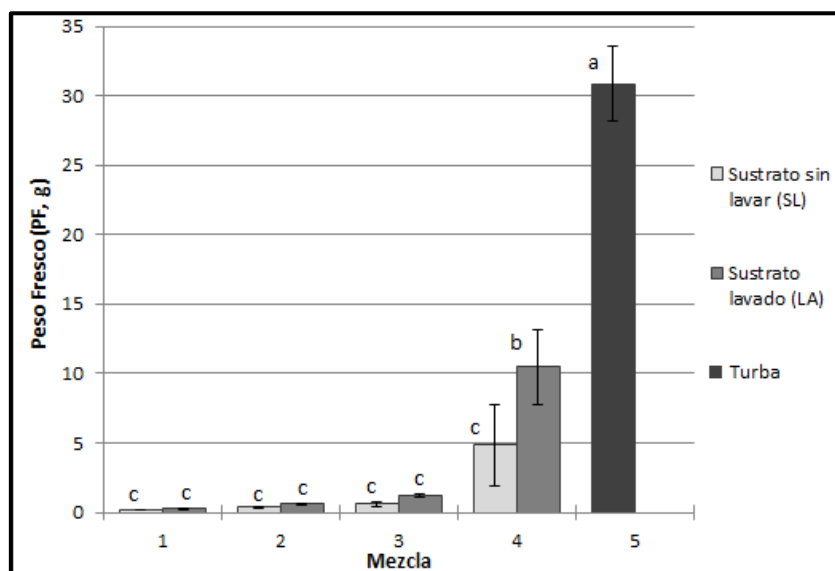


Figura 34 - Valores de peso fresco (PF, g/planta), obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

En este caso vemos que las plantas crecidas en el sustrato 5TB, con un PF medio superior a los 30g/planta, presentaron un crecimiento significativamente superior a las del resto de tratamientos. El tratamiento 4LA fue el que presentó mayores valores después del 5TB, alcanzando un PF medio de unos 10g/planta. Con el resto de sustratos apenas crecieron las plantas, obteniendo unos valores medios de PF inferiores a 1g/planta en casi todos los casos.

PESO SECO (PS)

Al igual que con el peso fresco, la mezcla utilizada tuvo una influencia estadísticamente significativa ($p<0,05$) en el peso seco de la parte aérea (hojas + tallos + flores) de las plantas de geranio, como puede observarse en la Figura 35.

En este caso también fue la mezcla 5TB la que mayor peso seco medio presentó, con un valor de 5,70 g/planta. El resto de tratamientos fueron significativamente inferiores, con valores de PS que apenas superaban los 0,1 g/planta en la mayoría de casos, exceptuando los tratamientos 4SL y 4LA que tuvieron un PS medio de 0,80 y 1,44 g/planta respectivamente.

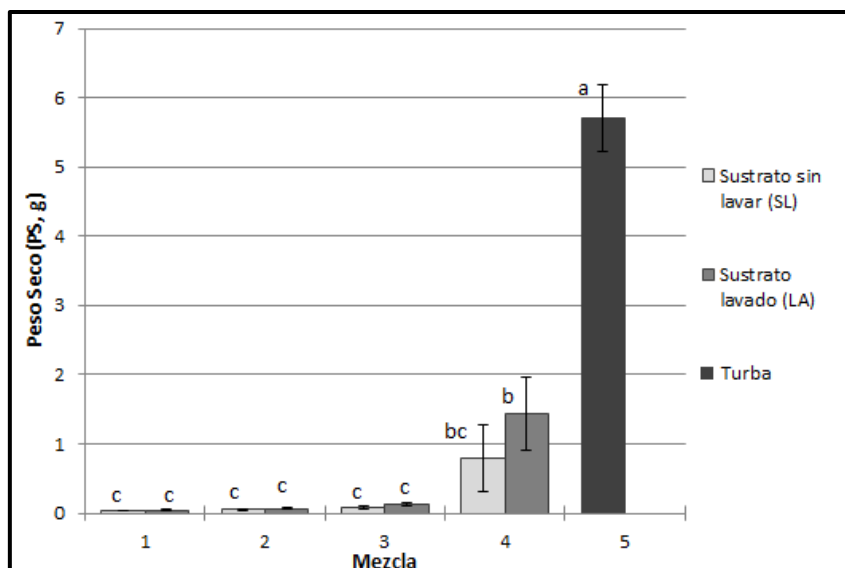


Figura 35 - Valores de peso seco (PS, g/planta), obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. Mezclas: 1: 100% LDP. 2: 75% LDP+ 25% turba. 3: 50% LDP + 50% turba. 4: 25% LDP + 75% turba. 5: 100% turba.

ALTURA DEL VÁSTAGO (mm)

En cuanto a la altura del vástago, también se observaron importantes diferencias entre los distintos sustratos aplicados. Destacó igualmente el tratamiento 5TB, con una altura del vástago media superior a los 130 mm. El resto de tratamientos tuvieron una altura significativamente inferior, no llegando a los 90 mm de altura en ningún caso.

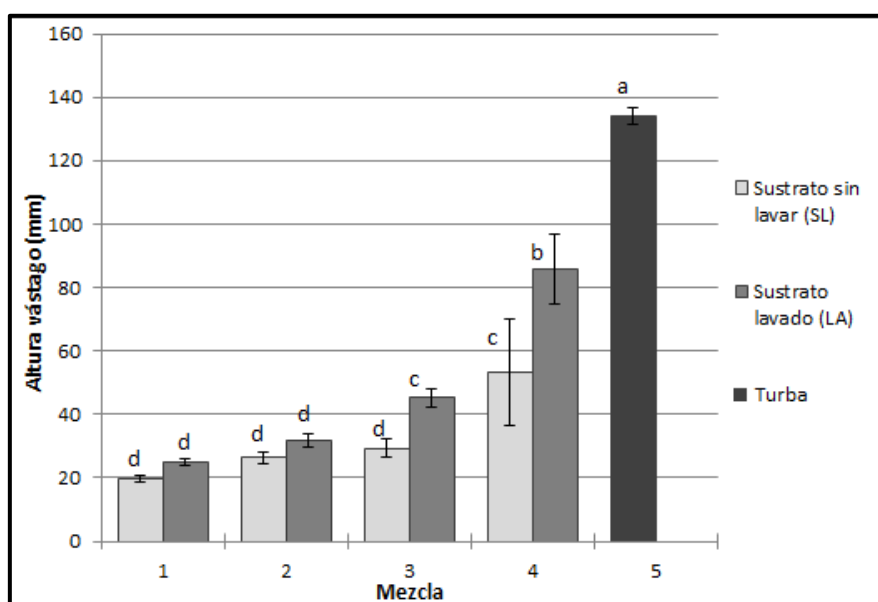


Figura 36 - Resultados de altura del vástago (mm) obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. (Mezclas: 1: 100% lodo deshidratado de papelera. 2: 75% papel+ 25% turba. 3: 50% papel + 50% turba. 4: 25% papel + 75% turba. 5: 100% turba).

NÚMERO DE HOJAS

El sustrato aplicado también tuvo una influencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en el número de hojas de las plantas de geranio (Figura 37).

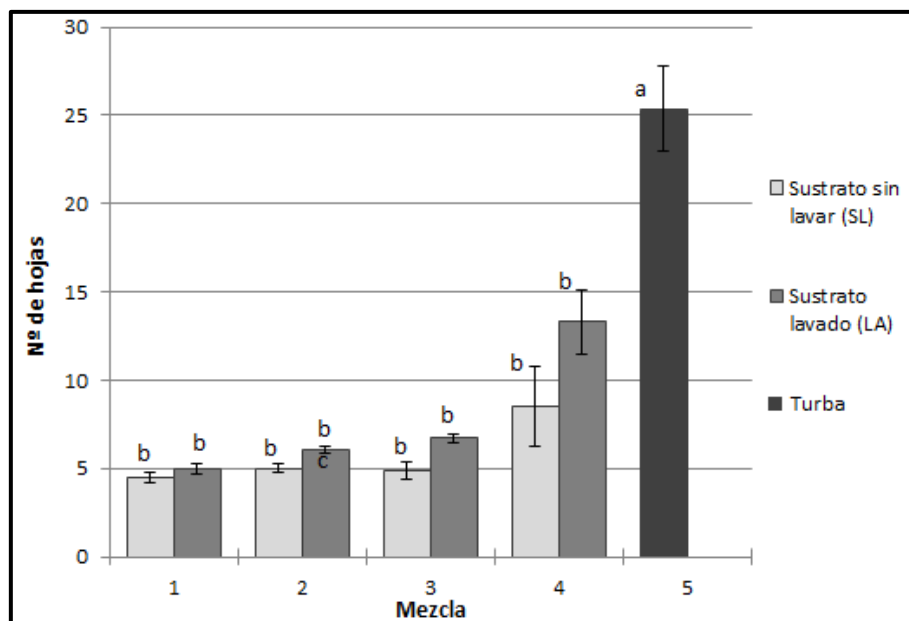


Figura 37 - Resultados de número de hojas obtenidos para las plantas de geranio para cada mezcla estudiada. (Mezclas: 1: 100% lodo deshidratado de papelería. 2: 75% papel+ 25% turba. 3: 50% papel + 50% turba. 4: 25% papel + 75% turba. 5: 100% turba).

Igual que en los parámetros anteriores, el tratamiento 5TB presentó de media un número de hojas significativamente superior al resto de tratamientos, superando las 25 hojas por planta. Entre el resto de tratamientos no se observaron diferencias significativas y tuvieron entre 4 y 13 hojas, aumentando ese valor conforme aumentaba el porcentaje de turba en la turba.

NÚMERO DE FLORES

Por último, como ya se ha comentado en apartados anteriores, las plantas de geranio apenas presentaron flores. Sólo algunas plantas del tratamiento 5TB florecieron la última semana del ensayo, pero hubo que cosechar las plantas para poder redactar los resultados del presente trabajo. Por lo tanto, no se presentan resultados para dicho parámetro.

En las Figuras 38 a 40 se muestran visualmente las diferencias encontradas en el crecimiento de plantas de geranio entre las distintas mezclas empleadas.



Figura 38 - Comparación entre plantas de geranio crecidas en cada uno de los sustratos ensayados.



Figura 39 – Comparación entre plantas de geranio crecidas en cada uno de los sustratos en los cuales el LDP estaba lavado y el control con turba (5TB).



Figura 40 – Comparación entre plantas de geranio crecidas en cada uno de los sustratos en los cuales el LDP estaba sin lavar y el control con turba (5TB).

4.4. DISCUSIÓN GENERAL

En vista de los resultados, parece que los Lodos Deshidratados de Papelera (LDP) pueden producir serios problemas de fitotoxicidad o de retraso de la producción en los casos más favorables de las mezclas propuestas. Además, también hay que destacar la aparición de hongos surgida en el mes de junio, aunque parece que no tuvo relevancia ya que no atacaron a las plantas ornamentales y se podrá resolver con un tratamiento fungicida previo al LDP.

En el caso del **geranio**, parece ser que ninguna de las mezclas ensayadas cumpliría los requisitos necesarios para producir plantas de calidad en un período de tiempo adecuado. Las plantas de geranio de los tratamientos 4LA y 4SL no presentaron síntomas de fitotoxicidad y crecieron con normalidad, pero mucho más despacio que las plantas crecidas en el tratamiento 5TB. Por tanto, esto sería un problema a la hora de utilizar dichas mezclas para producción de plantas ornamentales a nivel comercial, ya que retrasarían en exceso el ciclo de producción, ocupando durante más tiempo el invernadero y reduciendo así el número de plantas que se podrían producir por temporada.

En cuanto a la producción de plantas de **petunia**, en este caso las plantas crecidas en la mezcla 4LA no han presentado diferencias significativas con las crecidas en la mezcla 5TB (100% turba), lo que indica que esta mezcla se podría utilizar de manera satisfactoria en la producción de plantas de petunia de calidad para su venta. No obstante, habría que tener en cuenta que las plantas del tratamiento 4LA se recolectaron 10 días más tarde que las del tratamiento 5TB, por lo que habría que estudiar si compensa dicho retraso en la producción con los beneficios que supone utilizar un residuo orgánico como componente de sustratos de cultivo.

Un aspecto a resaltar de los procesos de lavado del sustrato es que el agua resultante del mismo es a su vez un contaminante potencial del medioambiente, ya que arrastra sales y otras sustancias solubles que podrían generar problemas. Para evitarlo, sería necesario disponer de un proceso complementario de depuración de estas aguas con solutos. Una opción sería la de aplicarlas en riego, por aspersión o por gravedad, en campos de cultivo. De todas formas, este proceso encarecería el sistema de gestión del LDP y habría que sopesar económica y medioambientalmente su aplicación.

Por tanto, la utilización directa de residuos orgánicos frescos en Agricultura presenta una serie de inconvenientes: fitotoxicidad (por compuestos orgánicos, elementos y sustancias minerales, etc), deficiencia de oxígeno en el entorno radicular, y elevación de la temperatura de la

rizosfera, entre otros (Abad *et al.*, 1997; Pascual *et al.* 1999), por lo que resulta conveniente que dichos residuos sean sometidos a tratamientos previos a su utilización.

Uno de los métodos más utilizados para la adecuación de los residuos orgánicos con fines agrícolas es el compostaje, destacando dicho proceso tanto desde el punto de vista ecológico como económico.

En la actualidad, el compostaje es un proceso tecnológico industrializado, no excesivamente complejo, técnica y económicamente viable, poco contaminante y que, además, tiene mayor aceptación social en comparación con el vertido controlado o la incineración (Mendoza, 2010). Por lo tanto, sería interesante plantear el mismo ensayo pero con el LDP compostado, para ver si así disminuyen los problemas por fitotoxicidad y se consigue producir unas plantas ornamentales de calidad en un período de tiempo adecuado.

Por último otro proceso sencillo y barato para dar salida a estos LDPs es la de su utilización directa como enmiendas de suelos cultivados. El uso de lodos de depuradora como material fertilizante o para la rehabilitación de suelos degradados, es una práctica habitual en los últimos años. Este tipo de subproductos aportan una mejora de las propiedades físico-químicas del suelo debido a la mejora que proporcionan en la fertilidad física, por ejemplo favoreciendo la formación de agregados, como en la fertilidad química u orgánica, aumentando la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica del suelo, disminuyendo la compactación, aumentando la capacidad de almacenamiento de agua, etc. Recientemente también se ha experimentado con lodos de la industria papelera, ricos en carbonatos y celulosa, como enmiendas para reducir la acidez de suelos y así obtener una mejora de la estructura y una atenuación del efecto tóxico en suelos contaminados por metales pesados (Pardini, 2008).

Tanto en la vía del compostaje como en su adición como enmienda de suelo hay que tener en cuenta el bajo contenido de N del LDP (<1%) y su alto contenido en C (69%) y, derivado de ello, el riesgo de secuestro de N en los medios (sustratos o suelo) en los que se aplique.

En definitiva, parece desaconsejable utilizar el LDP directamente como componente de sustratos ya que su posible utilización pasaría por la aplicación de un proceso de lavado intensivo que generaría un nuevo elemento contaminante medioambiental como son las aguas utilizadas para dichos lavados.

5. CONCLUSIONES

El objetivo general del presente Trabajo Fin de Máster era evaluar un Lodo Deshidratado de Papelera como componente de sustrato de cultivo en maceta, tanto lavado como sin lavar, y con ello identificar la proporción máxima de dicho lodo que se podía incorporar a una mezcla con turba para obtener plantas de geranio y petunia de calidad. A continuación se exponen las conclusiones obtenidas después de realizados los pertinentes ensayos:

- Los sucesivos 4 lavados del LDP provocaron un importante descenso de la CE del sustrato reduciéndola en un 65% y, sorprendentemente, provocaron un ligero incremento de 0,5 puntos en el pH del mismo. *A priori* parece que no hubiera sido necesario realizar tantos lavados del sustrato inicial ya que su CE no era excesivamente elevada.
- Los resultados obtenidos en el bioensayo de germinación resultan contradictorios con el análisis químico. A pesar de que la CE parecía adecuada para la germinación, se obtuvieron valores de Índice de Germinación del LDP no lavado inferiores a 60, es decir, fitotóxicos, tanto para lechuga como para berro. Por tanto, sería interesante realizar un análisis del tipo de iones presentes en el agua de los sucesivos lavados para poder deducir cuales son los elementos que provocan dicha fitotoxicidad.
- Se observaron dos fases claramente diferenciadas en la fase de semillero:
 - Germinación y primeras hojas: se produjo una buena nascencia en general, destacando las mezclas con 25% de LDP sobre las demás.
 - Subsiguiente desarrollo: se produjo una aparición generalizada de gran mortandad de plantas provocada por: ausencia de nutrientes en los sustratos, exceso de riego (geranio) y fitotoxicidad de los sustratos.
- En el ensayo de crecimiento en invernadero de **petunia** no se encontraron diferencias significativas entre el sustrato testigo (5TB) y el sustrato con 25% de LDP lavado 4 veces (4LA) + 75% de turba para ninguno de los parámetros medidos (peso fresco, peso seco, altura del vástago, nº de hojas y nº de flores). Si se encontraron diferencias significativas de estos dos tratamientos con el resto de mezclas.
- En el ensayo de crecimiento en invernadero de **geranio** se encontraron claras diferencias significativas entre el sustrato testigo de turba y el resto de las mezclas ensayadas para todos los parámetros medidos (peso fresco, peso seco, altura del vástago, nº de hojas y nº de flores).

- Por tanto, la proporción máxima de LDP que se podría incorporar a una mezcla con turba para obtener plantas de petunia de calidad sería 25%, teniendo en cuenta y valorando económicamente el retraso en la producción.
- A partir de los resultados obtenidos no se puede recomendar el uso del LDP directamente como componente de sustratos para plantas de geranio, sugiriéndose su empleo como enmienda de suelos, antes de su vertido o incineración.
- Una opción interesante sería repetir el presente ensayo una vez el LDP haya pasado por un proceso de compostaje.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abad, M., Martínez, P.F., Martínez, M.D. y Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11, pp. 141-154.

Abad, M., Noguera, P., Noguera, V., Roig, A., Cegarra, J. y Paredes, C. 1997. Reciclado de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 19, pp. 92-109.

Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: *Tratado de Cultivo sin suelo*, pp. 113-158. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Abad, M., Fornés, F., Mendoza-Hernández, D., García de la Fuente, R. 2008. Uso de compost como sustrato o componente de sustratos en viveros y semilleros. Tendencias futuras. IX Jornadas de Sustratos. Pamplona 16-18 septiembre 2008. *Actas de Horticultura* 53, pp. 17-31.

Ansorena Miner, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Ansorena Miner, J. (Ed.). 2014. XI Jornadas de Sustratos. *Actas de Horticultura*, 67. Pp. 1.

Aspapel, 2015. Memoria de sostenibilidad, Junio, 2015.

Brundtland, Gro Harlem and Mansour Khalid. 1987. Report of the World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford University Press.

Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hyman, London.

Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid.

Bustamante, M.A., Paredes, C., Moral, R., Agulló, E., Pérez-Murcia, M.D., Abad, M. 2008. Compost from distillery waste as peat substitutes for transplant production. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, pp. 792-799.

Carrión, C. 2006. Desarrollo de nuevos sustratos de cultivo para la producción de planta ornamental en maceta a partir de composts de residuos de cultivos hortícolas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Castro, F.J., Moreno, A., García, A. y Ortiz, F. 2014. El cultivo de *Lepista nuda* en sustrato con hojas de olivo para el aprovechamiento de subproductos agroindustriales en almazaras. *Anales de Biología*, nº36, pp. 11-17.

Chong, C. 2005. Experiences with wastes and composts in nursery substrates. *HortTechnology* 15, pp. 739-747.

Corrochano, A. 2006. Acuerdo entre el Ministerio y ASPAPEL. La industria papelera “se moja”. *Ambienta*, núm. 53, pp. 25-30.

De Boodt, M., Verdonck, O., Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, pp. 2054-2062.

Del Val, A. 2009. El problema de los residuos en la sociedad del bienestar. Madrid. Consultado en <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n50/aaval.html>

Del Val, A. 2013. Del consumo de recursos a la generación de residuos. El enorme coste humano y ambiental de nuestro consumismo. *Documentación social*. Núm. 167, pp. 129-152.

Domeño Seminario, I. 2009. Evaluación de nuevos materiales a partir de fibra de madera como sustratos de cultivo hidropónico. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra.

Elías Castells, X. (Ed.). 2009. Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora. 2ª edición. Ediciones Díaz de Santos. España.

España, 2010. Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. *Boletín Oficial del Estado*, de 14 de julio de 2010, núm. 170, pp. 61831-61859.

España, 2011. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial del Estado*, de 29 de julio de 2011, núm. 181., pp. 85650-85705.

España, 2015. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. Consultado en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm7-401704.pdf

Europa, 2008. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, de 22 de noviembre de 2008, núm. 312, pp. 3-30.

Eurostat. 2015. Estadísticas sobre residuos. Consultado en: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/es

- Fornes, F., Belda, R.M., Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., Noguera, V. 2003. The microstructure of coconut coir dusts for use as alternatives to peat in soilless growing media. *Australuan Journal of Experimental Agriculture*, 43, pp. 1171-1179.
- López-Cuadrado, M.C., Ruiz-Fernández, J., Masaguer, A. 2007. Respuesta del cultivo *Dianthus caryophyllus* en diferentes sustratos eco-compatibles procedentes de subproductos orgánicos de distintos sectores de producción. *Actas de Horticultura*, 47. VIII Jornadas de Sustratos de la SECH, Tenerife.
- Macías, F.J., Arias, D.J, Vela, M.D., Andrade, A., Cermeño, P., García-Morales, J.J. y Solera, R. 2008. Valoración agronómica de los compost de residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora como sustratos alternativos a las turbas en la producción en contenedor de *Euphorbia pulcherrima*. *Actas de Horticultura*, 52. I Simposio Iberoamericano- IV Jornadas Ibéricas de Horticultura Ornamental. Pontevedra.
- Mendoza, D. de J. 2010. Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Producción Vegetal.
- Moreno, J., y Moral, R. 2008. Compostaje. Ediciones Mundi-prensa. Madrid.
- Ou-Yang, W., Wu, W. 2002. Investigations of Paper Mill Sludge as a Component of Container Medium. *Plant Pathology Bulletin*, nº 11, pp. 19-24.
- Pardini, G., Vila, A., Gispert, M., Pelach, M.A., Mutjé, P. 2008. Uso experimental de un lodo de la industria papelera para atenuar la movilidad de metales pesados en suelos. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón.
- Pascual, J.A., García, C., y Hernández, T. 1999. Comparison of fresh and composted organic waste in their efficacy for the improvement of arid soil quality. *Bioresource Technology* 68, pp. 225-264.
- Pire, R. y Pereira, A. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, vol. 15, nº. 1, pp. 55-63.

Ramos Alvariño, C. 2005. Reseña analítica. Residuos orgánicos de origen urbano e industrial que se incorporan al suelo como alternativa económica en la agricultura. Revista CENIC Ciencias Químicas, vol. 36, núm. 1, pp. 45-53

Residuos profesional. 13 de marzo de 2016. La industria del papel y la economía circular. Consultado en: <http://www.residuosprofesional.com/industria-papel-y-economia-circular/>

Red Española de Compostaje. 2015. Uso del Compost como componente de sustratos para cultivo en contenedor III.2. *En: De Residuo a Recurso. El camino hacia la Sostenibilidad.* Ediciones Mundi-Prensa. Madrid

Russel, C., Odendahl, S. 1996. Environmental considerations for landfill development in the pulp and paper industry. Pulp Paper Can, nº 97, pp. 51-56.

Sánchez Carpintero, C. 2012. El papel: una industria ecoeficiente basada en el ciclo natural. Ingeniería química, nº 503, pp. 32-37.

Sánchez-Monedero, M., Roig, A., Cegarra, J., Bernal, P., Noguera, P., Abad, M, Antón, A. 2004. Composts as media constituents for vegetable transplant production. Compost Science and Utilization, 12, pp. 161-168.

Terés Terés, Valentín. 2001. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M y De Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. BioCycle, nº 22, pp. 54-57.

7. ANEXO

"Estudio de viabilidad de alternativas de gestión de lodos papereros"

FICHA ANALÍTICA COMPARATIVA de RESIDUO



- EMPRESA: 10. PAPELERA GUÍPUZCOANA DE ZICUÑAGA

- RESIDUO: Lodo depuración

Analítica RESIDUO	TECNOMA 2006	LAB 1	LAB 2	RANGO TIPO
Propiedades físico-químicas				
- Densidad Aparente (g/cm³)	0,68			1,3 - 1,4
- Humedad (%)	40			47,8 - 50,8
- Sólidos Totales (550°C) (%)	27			31,3 - 32
Análisis inmediato				
- Cenizas (%)	27			14,8 - 21,8
- Volátiles (%)	73			
Agronómicos				
- pH	7,3			
- Textura				
- Conductividad (µS/cm)	999			
- Nitrógeno total (%)	<1			
- Materia orgánica (%)	73			40
- Fósforo Olsen (%)	0,63			
Análisis elemental (sms)				
- C (%)	69			
- H (%)	<1			
- N (%)	<1			
- S (%)	<0,5			
- O (por diferencia) (%)	3			
- Cl (ppm)	210			380 - 470
- F (ppm)	3,9			
Poder calorífico				
- PCS (kcal/kg)	5.950			724 - 850
- PCI (kcal/kg)	5.715			393 - 438
Elementos traza metálicos (sms)				
- Cd (ppm)	0,17			0,02 - 25
- Hg (ppm)	<0,1			0,01 - 225
- Pb (ppm)	<10			0,50 - 50
- Cu (ppm)	<10			0,107 - 133
- Ni (ppm)	<5			0,21 - 25
- Zn (ppm)	11			1,14 - 19
- Cr (ppm)	4			0,10 - 25
- Ti (ppm)	<10			
- As (ppm)	<0,5			0,10 - 25
- Sb (ppm)	2,1			<0,2
- Mn (ppm)	53			
- Co (ppm)	<2			
Analítica LIXIVIADO				
- Ecotoxicidad (mg/l)	250.000			206.346 - 339.158
- Conductividad (µS/cm)				
- pH				
- Materia orgánica (%)				
- Cloruros (ppm)				
- Sulfatos (ppm)				
- Fluoruros (ppm)				
- Fenoles (ppm)				
- Mercurio (ppm)				
- Cadmio (ppm)				
- Bario (ppm)				
- Zinc (ppm)				
- Cobre (ppm)				
- Cromo (ppm)				
- Molibdeno (ppm)				
- Níquel (ppm)				
- Plomo (ppm)				
- Arsénico (ppm)				
- Antimonio (ppm)				
- Aluminio (ppm)				
- Selenio (ppm)				
Analítica CENIZAS				
Composición química (sms de la muestra inicial)				
- Al ₂ O ₃ (%)	0,06			6,3 - 11,9
- CaO (%)	9,8			18,9 - 30,1
- Fe ₂ O ₃ (%)	0,06			0,41 - 0,46
- K ₂ O (%)	0,02			<0,05 - 0,22
- MgO (%)	0,05			1,2 - 1,9
- Na ₂ O (%)	0,2			0,12 - 0,13
- P ₂ O ₅ (%)	1,4			
- SiO ₂ (%)	2,0			8 - 17,1

1. Nota sobre cenizas.

2. Los valores del RANGO TIPO corresponden a la mezcla de: 84% lodo destintado y 16% lodo depuración, obtenidos del Estudio del IHOBE
